

# COUPLING OPENSEES WITH CEINCI-LAB TO PERFORM NON-LINEAR STATIC ANALYSIS. FIRST PART: SEISMIC REINFORCEMENT WITH STEEL BRACES

Brian Cagua<sup>(1)</sup>, Roberto Aguiar<sup>(2,3)</sup>, Julia Pilatasig<sup>(1)</sup>, David Mora<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup>Maestría en Estructuras. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. [bjcagua@espe.edu.ec](mailto:bjcagua@espe.edu.ec)  
[jepilatasig3@espe.edu.ec](mailto:jepilatasig3@espe.edu.ec)

<sup>(2)</sup>Profesor. Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de Fuerzas Amadas ESPE. Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos. [rraquiuar@espe.edu.ec](mailto:rraquiuar@espe.edu.ec)

<sup>(3)</sup>Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ULEAM.

<sup>(4)</sup>Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Escuela Politécnica Nacional.  
[edgar.mora@epn.edu.ec](mailto:edgar.mora@epn.edu.ec)

Received: January 2020. Accepted: March 2020  
Published: July 1, 2020

## ABSTRACT

**CEINCI-LAB** is a computer system that allows static or dynamic analysis of structures. This article presents the interaction of **CEINCI-LAB** functions with OpenSees commands for the development of nonlinear static analysis using the Pushover technique of a steel structure. The steel structure considered in this study is a 6-story, with 4 column axes, and different structural reinforcement mechanisms such as the chevron brace and multi-story X-brace.

OpenSees requires a certain effort to enter the geometry of the frames of the structures, involving more time when working multi-story structures, since each of the nodes that will make up the elements must be defined, be they beams, columns or diagonals in the case of structures with reinforcement and indicate how with these nodes each element is formed with a particular property and material. This article seeks to emphasize the benefits of developing analysis with the help of these two computational tools. The new functions of **CEINCI-LAB** facilitate the entry of multi-story structures and the creation of nodes in the center of the openings to analyze the reinforced structure.

Both **CEINCI-LAB** and OpenSees can generate this analysis (Pushover) to form directly without the interaction between them, however, by coupling certain **CEINCI-LAB** functions, data entry and presentation of results is facilitated and the user can focus on understand the behavior of the structure without the complexity that programming in OpenSees can represent.

**keywords:** OpenSees. Computer system **CEINCI-LAB**. Nonlinear Static Analysis. Pushover. Seismic Reinforcement with steel braces.

# ACOPLAMIENTO DE OPENSEES CON CEINCI-LAB PARA ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL. PRIMERA PARTE: REFORZAMIENTO SÍSMICO CON DIAGONALES DE ACERO

## RESUMEN

**CEINCI-LAB** es un sistema de computación que permite el análisis estático o dinámico de estructuras. En este artículo se presenta la interacción de las funciones de **CEINCI-LAB** con comandos de OpenSees para el desarrollo del análisis estático no lineal mediante la técnica de Pushover de una estructura de acero. La estructura en análisis es de 6 pisos, con 4 ejes de columnas, además se presenta diferentes mecanismos de reforzamiento estructural en base a diagonales de acero ubicadas en forma de V invertidas y de X de piso a piso.

OpenSees requiere cierto esfuerzo para el ingreso de la geometría de los pórticos de las estructuras, involucrando mayor tiempo cuando trabajamos estructuras de varios pisos, ya que se debe definir cada uno de los nudos que conformarán los elementos, sean estos vigas, columnas o diagonales en el caso de estructuras con reforzamiento e indicar como con estos nudos se forma cada elemento con una propiedad y material particular. Este artículo busca enfatizar las bondades de desarrollar el análisis con la ayuda de estas dos herramientas computacionales. Las nuevas funciones de **CEINCI-LAB** facilitan el ingreso de estructuras de varios pisos y la creación de nudos en el centro de los vanos para analizar el pórtico reforzado.

Tanto **CEINCI-LAB** como OpenSees pueden generar este análisis (Pushover) de forma directa sin la interacción entre ellos, sin embargo, al acoplar ciertas funciones de **CEINCI-LAB** el ingreso de datos y la presentación de resultados se facilita y el usuario puede enfocarse en entender el comportamiento de la estructura sin la complejidad que puede representar la programación en OpenSees.

**Palabras Claves:** OpenSees. Sistema de computación **CEINCI-LAB**. Análisis Estático No Lineal. Pushover. Reforzamiento con diagonales de acero.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Técnica del Pushover o Técnica del Empujón, tuvo un gran desarrollo a finales del siglo XX y todavía se continúa trabajando en esta temática, porque ayuda a visualizar el probable desempeño que va a tener una estructura durante un terremoto. Importantes investigaciones se han realizado aplicando programas como DRAIN-2DX, para analizar conexiones en estructuras de hormigón armado utilizando análisis estático no lineal, que es otra forma de conocer al Pushover. Godínez y López Almansa, (2014).

Se ha estudiado la disipación de estructuras de acero con diagonales concéntricas y excéntricas; mediante el análisis dinámico incremental que se fundamenta en el Pushover. E. Del Valle *et al.* (2014). De igual manera el efecto

de los modos superiores en estructuras de hormigón con contraventeo metálico tipo Chevrón, mediante un Pushover modal. Godínez y Tena, (2014).

Experimentalmente se ha validado la curva de capacidad sísmica que relaciona el cortante basal con el desplazamiento lateral máximo, encontrado con la técnica del Pushover y se vio que era muy similar a la que se obtuvo al ensayar varios pórticos de hormigón armado de un vano y un piso ante cargas laterales monotónicas. Díaz et al. (2015). Se ha presentado únicamente 3 referencias sobre las aplicaciones que se tienen a partir de los resultados que se hallan en base al Pushover, y una validación experimental. Con esto lo que se desea mostrar es que este tema es muy actual y es así como se han realizado valiosos aportes al sistema de computación **CEINCI-LAB** para hallar la curva de capacidad sísmica resistente. Para citar un caso se hace referencia al trabajo de Mora y Aguiar (2015, 2) donde se presenta la Técnica del Pushover Multimodal, aplicado al análisis de estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS.

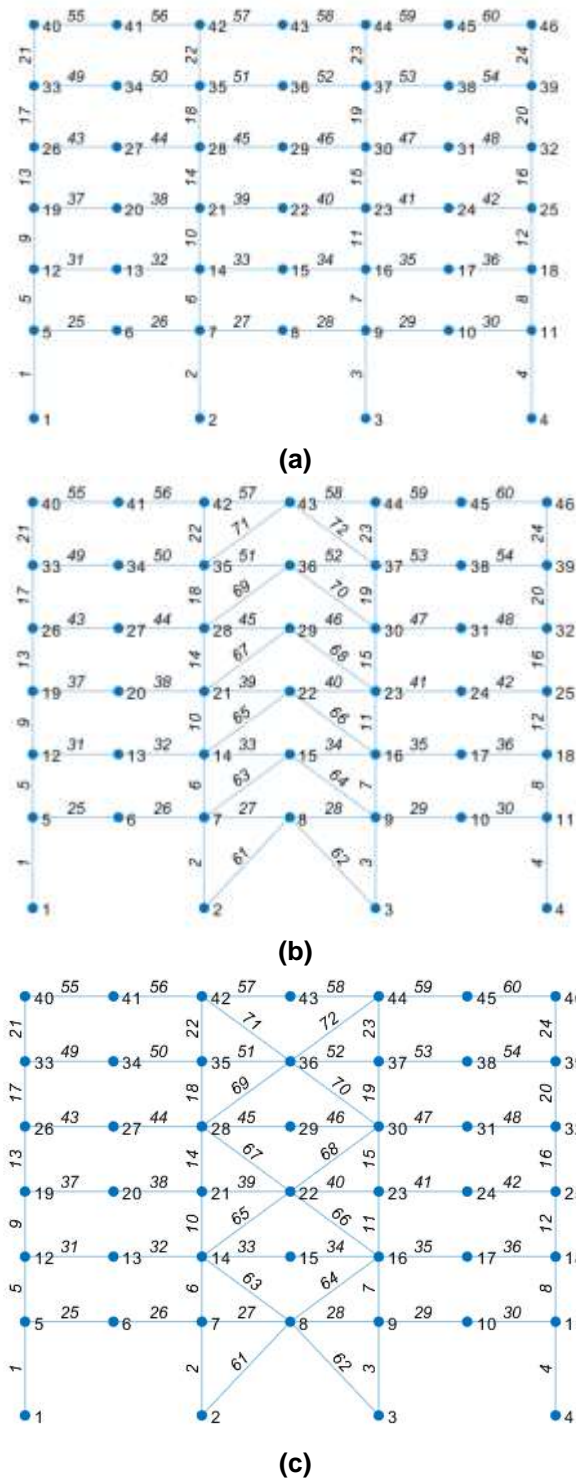
Por otra parte, se han hecho importantes contribuciones a la Ingeniería Sísmica, por medio de la Técnica del Pushover en el análisis de estructuras de acero, utilizando el sistema OpenSees, Open System for Earthquake Engineering Simulation (Tapia y Gutiérrez, 2016).

En la figura 1a, se tiene una estructura de acero de 6 pisos, la misma que puede ser reforzada con diagonales en forma de “V” invertida (figura 1b), donde en cada piso una diagonal trabaja a compresión y la otra a tracción; se debe tener cuidado que la diagonal a compresión no ingrese al rango no lineal, ya que se puede presentar un comportamiento indeseable en la viga a la que conectan, aunque esto se puede evitar utilizando secciones grandes en las diagonales para que el factor de esbeltez sea bajo, con lo que se minimiza el problema de pandeo.

Otra opción en la que se elimina el problema de pandeo, es reforzar con diagonales en forma de “X”, ahí las diagonales en un sentido (piso inferior y piso superior) trabajan a compresión y las diagonales en el otro sentido (piso inferior y piso superior) trabajan a tensión, de tal manera que existe equilibrio en el nudo central de la viga; cuando estos elementos desarrollen su máxima capacidad a compresión y a tracción, se anula y no hay el problema que puede darse en el caso anterior. Lo que interesa ilustrar por ahora en la figura 2, es la sencillez con que se ingresan los datos al sistema **CEINCI-LAB** para dibujar las estructuras.

En la figura 1b, se presenta la estructura reforzada con diagonales en forma de “V” invertida y en la figura 1c, se tiene la estructura reforzada con diagonales en forma de “X”, de piso a piso. El programa que dibuja las tres estructuras se indica a continuación y se puede ver que es extremadamente sencillo dibujarlas con **CEINCI-LAB**.

Con los datos **sv**, **sp** y con las funciones: **geometria\_nudo\_viga**; **glinea\_portico2**; **gn\_portico2**, se dibuja la estructura sin diagonales (ver figura 1a), lo importante es que ya están definidas las coordenadas X, Y de la estructura y los vectores NI, NJ, que contienen a los nudos iniciales y finales de los elementos.



**Figura 1** a) Estructura sin reforzamiento; b) Estructura reforzada con diagonales en forma de "V" invertida; c) Estructura reforzada con diagonales en forma de "X".

Código para generar la geometría de las estructuras:
<pre> % Ej_generacion_porticos %% Primer Pórtico es una estructura de acero sin reforzamiento sv=[7.315;7.315;7.315]; % Luces de los vanos sp=[5.486;3.810;3.810;3.810;3.810;3.810]; % Alturas de cada piso  % Rutinas para generar la geometría del pórtico sin diagonales [nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp); [X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr); [NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg); figure (1) dibujoplano(X,Y,NI,NJ)  %% Segundo Pórtico se refuerza el vano central con diagonales en forma de V invertida mar=[2;5;8;11;14;17]; % Número de vano con reforzamiento  % Rutinas para ingresar diagonales V invertida [GEN]=geometria_nudo_diagonales(nv, np, nudt, mar); [NI2,NJ2]=gn_portico(GEN); [NI,NJ]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2); figure (2) dibujoplano(X,Y,NI,NJ)  %% Tercer Pórtico se refuerza el vano central con diagonales en forma de "X" [nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp); [X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr); [NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg); mar=[2;8;14]; % Número de vano con "V" invertida marv=[5;11;17]; % Número de vano con "V"  % Rutinas para ingresar diagonales en forma de X [GEN]=geometria2_nudo_diagonales(nv, np, nudt, mar, marv); [NI2,NJ2]=gn_portico(GEN); [NI,NJ]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2); figure (3) dibujoplano(X,Y,NI,NJ) </pre>

**Figura 2** Código para generar las geometrías de las estructuras en análisis.

Para dibujar las diagonales se debe ver la numeración de los vanos que se tiene en la figura 3, y únicamente en el vector **mar** se identifican los vanos donde se encuentran las diagonales en forma de "V" invertida; lo que resta ahora es identificar el nudo inicial y final de cada diagonal, esto se lo hace con las funciones: **geometria\_nudo\_diagonales** y **gn\_portico**. Finalmente, se incorporan los nudos iniciales de las diagonales NI2, NJ2 a los nudos iniciales y finales de la

estructura sin diagonales NI, NJ; la incorporación se la hace con la función **gn\_portico3**

Un procedimiento similar se realiza para colocar las diagonales en forma de “X”, primero en el vector **mar** se indica los vanos de las diagonales en forma de “V” invertida y con el vector **marv** se identifican los vanos con diagonales en “V”. La obtención de los vectores con nudos iniciales y finales de las diagonales en forma de “X” se realiza con las funciones: **geometria2\_nudo\_diagonales** y con la función **gn\_portico**. Por último, la incorporación de estos vectores, de las diagonales a los vectores de nudo inicial y final de los elementos sin diagonales se lo hace con la función **gn\_portico3**.

16	17	18
13	14	15
10	11	12
7	8	9
4	5	6
1	2	3

**Figura 3** Numeración de vanos para ingreso de diagonales.

Con 4 vectores de datos: **sv, sp, mar, marv**, son suficientes para generar los 3 pórticos de las figuras 1 a, b, c. Claro está que esto se realiza con la utilización de las funciones de **CEINCI-LAB**, pero realmente son muy pocas. (Aguiar *et al.* 2019)

Tanto **CEINCI-LAB** como OpenSees pueden generar este análisis (Pushover) de forma directa sin la interacción entre ellos, sin embargo, por facilidad para el ingreso de datos y la presentación de resultados se utilizan funciones de **CEINCI-LAB** y debido al potencial de comandos desarrollados en OpenSees se emplean funciones de este que permiten simular estructuras considerando la no linealidad de materiales con modelos que se asemejan de mejor manera a la realidad.

En lo que sigue de este artículo se va a encontrar la curva de capacidad sísmica resistente de una estructura de acero y su reforzamiento, utilizando las funciones de **CEINCI-LAB** para la entrada de datos y salida de resultados, además del cálculo propiamente dicho del Pushover que se lo hace con OpenSees.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA SIN REFUERZO

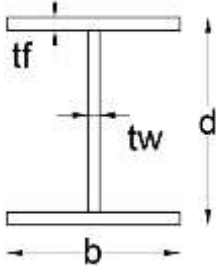
Lo principal es definir la geometría del pórtico en análisis, para este caso se tiene una estructura de acero con 3 vanos de 7.315 m y 6 pisos, la altura del primer nivel es de 5.480 m mientras que en los niveles superiores son de 3.810 m de altura (Fig. 4).



**Figura 4** Geometría de la estructura de acero de 6 pisos e identificación de las secciones.

Se utilizaron las siguientes propiedades de material para modelar el pórtico: ASTM A36,  $F_y = 36$  ksi,  $F_u = 40$  ksi y  $E = 29000$  Ksi. Las dimensiones de las columnas y vigas se definen en la Tabla 1, donde la identificación del color es consistente con la figura 4.

**Tabla 1** Descripción de las secciones de los elementos estructurales.

	Color	Elemento	Dimensiones (mm) $d \times b \times t_f \times t_w$
		Columnas W30x173	773x381x27x17
		Vigas W30x99	754x268x17x13

La carga correspondiente a los primeros 5 pisos es de 3.269 T/m y para el último piso se asigna 1.852 T/m como se muestra en la figura 5.

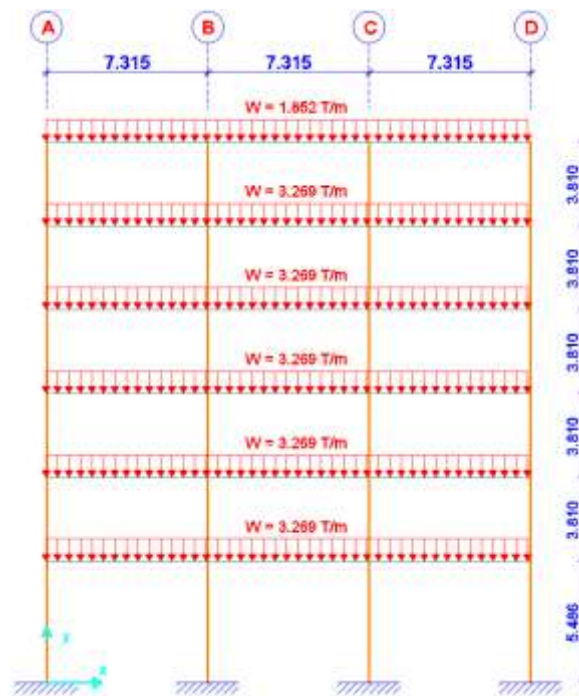


Figura 5 Distribución de cargas asignadas en las vigas del pórtico en análisis.

### 3. DATOS PARA CEINCI-LAB

#### 3.1 Geometría del pórtico principal

Con dos vectores se define la geometría de un pórtico regular en elevación, en el sistema de computación **CEINCI-LAB**. Estos vectores son: **sv** que contiene la separación de los vanos y **sp** la altura de cada uno de los pisos. Aguiar *et al.* (2019).

A continuación, en la figura 6 se muestra un fragmento del código del programa, donde la primera función que se utiliza es **global** seguido de una lista de variables, que son comunes para **CEINCI-LAB** y para **OpenSees**, se definen una sola vez, es similar a la función **Common** que se tiene en Fortran.

Luego se muestra los datos de geometría del pórtico (**sv**, **sp**), pesos y cargas distribuidas en las vigas de cada piso (**qp**). Adicionalmente se emplean funciones conocidas de **CEINCI-LAB** para determinar las coordenadas de los nudos (**X**, **Y**), la identificación del nudo inicial y final de cada elemento (**NI**, **NJ**) y los parámetros como longitud, seno y coseno de cada barra que corresponden a columnas y vigas en el pórtico de análisis (**L**, **seno**, **coseno**). También es importante conocer los grados de libertad que se deben asignar a cada nudo denominados **CG** y el vector de colocación **VC** que es la asignación de los grados de libertad en los nudos iniciales y finales de cada elemento. El marco teórico se presenta en Aguiar *et al.* (2019).



Con esto se tienen los datos con los cuales se calcula la matriz de rigidez del Pórtico, por ensamblaje directo y el vector de cargas generalizadas.

#### Código del programa principal, parte 1:

```

global DOF nod sv sp nv np nr X Y NI NJ n masa_nudo Xcol Ypisos L coseno Es
Abeam lbeam Mybeam Ks_beamxL qp Acol lcol Mycol Ks_colxL num_elem
Tabla_Elem_Nud DP DN th_pP th_pN th_pcP th_pcN Dis_Fuerzas_Laterales T W fi

%% Geometría del pórtico
sv =[7.315;7.315;7.315]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en
(metros)
sp =[5.486;3.81; 3.81; 3.81; 3.81; 3.81]; % Vector con la altura de pisos
(metros)
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-1.8517]; % carga distribuida en vigas
en cada piso T/m
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); %Calcula los grados de libertad
[VC]=vc(NI,NJ,CG);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));

```

Figura 6 Código del programa principal, parte 1.

### 3.2 Definición de masa

En el análisis estructural la matriz de masa es importante, porque la respuesta del análisis depende de este parámetro. Entre las opciones para modelar estas matrices se tiene, las matrices de masas concentradas (Lumped Mass Matrix) y matrices de masas consistentes (Consistent Mass Matrix).

En una matriz de masas concentradas, la masa de una parte de la estructura analizada es asignada al grado de libertad asociado, que está definido por un término de la diagonal de la matriz (García, 2013). Para definir esta matriz existen varios métodos, entre ellos los propuestos en trabajos de: Zaradnik, (2009); Zaradnik et al. (2006); Hughes (1987); también es posible definirla directamente en algunos casos.

Las matrices de masas consistentes, resultan de análisis variacional y tienen valores diferentes de cero, en la diagonal principal y fuera de ella (Paz, 1992). Para la definición de esta matriz se debe recurrir a la formulación de elementos finitos como se presenta en la ecuación 1 (Felippa, 2004), considerando la energía cinética del sistema e interpolando las velocidades, de forma similar a la que se interpolan los desplazamientos para la formulación de la matriz de rigidez.

$$m_{ij} = \int_V N_i^T \cdot \rho \cdot N_j dV \quad (1)$$

Donde  $N_i$  y  $N_j$  corresponden a las funciones de forma elementales que se hayan adoptado;  $\rho$  es la densidad del material y  $V$  el volumen del elemento.

Desde un punto de vista energético, esta matriz de masa es consistente con la matriz de rigidez porque ambos se basan en las mismas funciones de desplazamiento (Carr, 2009).

Acorde a Zaradnik *et al.* (2009), la definición de la matriz de masa empleada en un modelo tiene un gran impacto en el esfuerzo computacional al momento de resolver problemas numéricos. Además de Zaradnik, otros autores apoyan la premisa de que el modelo con masas consistentes podría llevar a resultados con mayor precisión, pero el esfuerzo computacional sería muy grande respecto al modelo donde se utilice masas concentradas. El modelo de masas concentradas además presenta la ventaja de que permite desacoplar las ecuaciones de movimiento de forma sencilla. Chopra (2012), indica que es más empleado el modelo de masas concentradas. Entre los parámetros de rigidez, masa, amortiguamiento para la simulación estructural, Carr (2009) manifiesta que la representación de rigidez es la más significativa en el análisis, el modelo de masa no es tan crítico siempre que se represente la masa total de la estructura.

Para los modelos planteados en esta investigación se emplea la matriz de masa concentrada (Lumped Mass Matrix), es decir que se asigna la masa de los elementos y cargas distribuidas a los nudos, de la unión viga-columna, para facilitar el análisis con OpenSees, a continuación, se muestra en la figura 7 la distribución de las masas nodales.

De forma general se calcula la carga colaborante a cada nudo (unión viga-columna), multiplicando la carga uniforme distribuida por el ancho colaborante, para este caso se define, de forma simplificada, como la mitad de la luz de cada vano que se une al nudo considerado; luego se halla la masa, dividiendo esta carga para el valor de la aceleración de la gravedad. Sumando los pesos de cada piso se halla el peso total del edificio.



**Figura 7** Distribución de masas en los nudos, para las funciones de OpenSees.

### 3.3 Patrón de fuerzas laterales para Pushover monótonico

El procedimiento para el análisis estático no lineal, conocido como Pushover, se describe en el documento ASCE/SEI 41-13, sección 7.4.3. De forma general, la aproximación estática consiste en aplicar fuerzas laterales a un modelo, considerando los efectos de no linealidad, estas fuerzas van aumentando hasta que se obtenga un desplazamiento objetivo o se alcance el colapso (Arango *et al.*, 2013). La curva de capacidad de una estructura se obtiene graficando los valores máximos de cortante basal y desplazamiento en el último nivel, como se muestra en la figura 8.

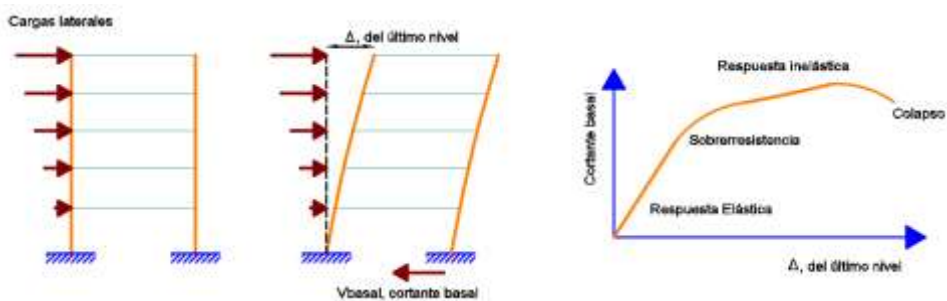


Figura 8 Secuencia de análisis Pushover.

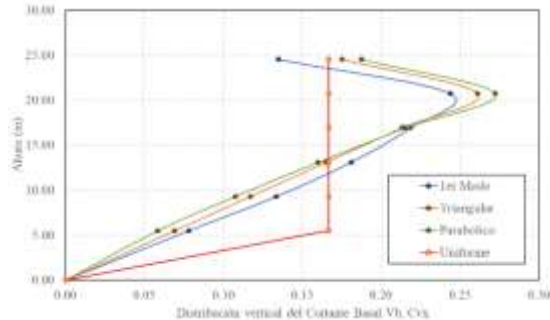
Según Carr (2009), la capacidad de la estructura depende del patrón de carga utilizado, es por ello que este es uno de los aspectos centrales en el análisis Pushover. La distribución de fuerza sísmica típica, que se encuentran en los códigos de diseño o que recomiendan autores en artículos de investigación, dependerá de la masa en cada nivel. Esta masa se distribuirá en la altura de la estructura en base a la siguiente ecuación.

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2)$$

Donde  $C_{vx}$  es un factor de distribución vertical de fuerzas laterales;  $w_i$  es la parte del peso total en la posición  $i$ , es decir en el nivel  $i$ ;  $w_x$  es la porción del peso total en la posición  $x$ , de igual modo esta posición representa el nivel  $x$ ;  $h_i$  es la altura del nivel  $i$  desde la base;  $h_x$  es la altura del nivel  $x$  medido desde la base y el factor  $k$  depende del método de distribución de fuerzas laterales.

Para el modelo de análisis en este artículo se debe definir cómo se realizará la distribución de fuerzas laterales en cada piso de la edificación, esto se lo indica con la variable **Dis\_Fuerzas\_Laterales**. El valor que esta variable puede tomar se encuentra entre 1 y 4, donde 1 corresponde a una distribución en base al primer modo de vibración de la estructura (en la ecuación 2,  $k = 1$  y en lugar de emplear el peso de la estructura se emplea el patrón de deformada del primer modo de vibrar); 2 es una distribución de fuerzas parabólica, donde  $k$  varía en función del periodo fundamental de la estructura, es decir que  $k = 1$  para  $T \leq 0.5$  (s) o  $k = 2$  para  $T \geq 2.5$  (s), para periodos en el rango de 0.5 a 2.5 (s) se empleara una variación lineal para estimar  $k$  en función del periodo fundamental; para un valor de 3, se tiene una distribución triangular, en este caso  $k=1$ ; finalmente si la variable **Dis\_Fuerzas\_Laterales** es 4 la distribución será uniforme, es decir que las fuerzas en cada piso serán iguales.

Para el análisis de la estructura, mostrada en la figura 4, se presenta la distribución de fuerzas laterales en función de la altura de la edificación, como se ilustra en la figura 9, más adelante se presenta el cálculo de su periodo fundamental que es igual a 0.7 (s).



**Figura 9** Distribución de fuerzas laterales en función de la altura de la estructura.

En la figura 10 se presenta el código con los datos de masas determinados en función de la carga distribuida en cada piso. Adicionalmente se escoge **Dis\_Fuerzas\_Laterales=1**, es decir, la distribución de fuerza laterales del patrón de cargas será en base a la deformada del primer modo de vibración.

#### Código del programa principal, parte 2:

```
%% Masas
W=zeros(np,1);
for t=1:np
sum=0;
for r=1:nv
sum=-qp(t,1)*sv(r,1);
W(t,1)=W(t,1)+sum;
end
end
sum=0; WBuilding=0;
for i=1:np
WBuilding=WBuilding+W(i,1); %Peso total en T
for ij=1:nv+1
if ij==1
NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(ij,1)/2;
elseif ij==nv+1
NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(nv,1)/2;
else
NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(ij-1,1)/2+(-qp(i,1)/g)*sv(ij,1)/2;
end
masa_nudo(i,ij)=NodalMass;
end
MASA(i,i)=W(i,1)/g;
end
Dis_Fuerzas_Laterales = 1; % 1 En función del primer modo de vibrar
```

**Figura 10** Código del programa principal, parte 2.

Con esta información es posible generar gráficos del pórtico en análisis con la función **dibujo**, también se puede representar los elementos y nudos con su identificación con **dibujoNudElem** como se muestra en la figura 11b (notar que las vigas consideran un nudo en el medio, es decir que en cada vano del pórtico se modelan 2 vigas). La función **dibujogdl** genera un gráfico con los grados de libertad que se han asignado a cada nudo como se presenta en la figura 11c.

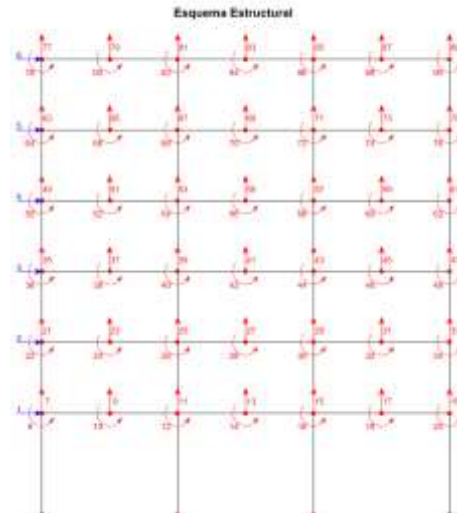
#### Código del programa principal, parte 3:

```
% Dibujo de la Estructura 2D
dibujo(X,Y,NI,NJ)
dibujoNudElem(X,Y,NI,NJ,CG)
dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)
```

(a)



(b)



(c)

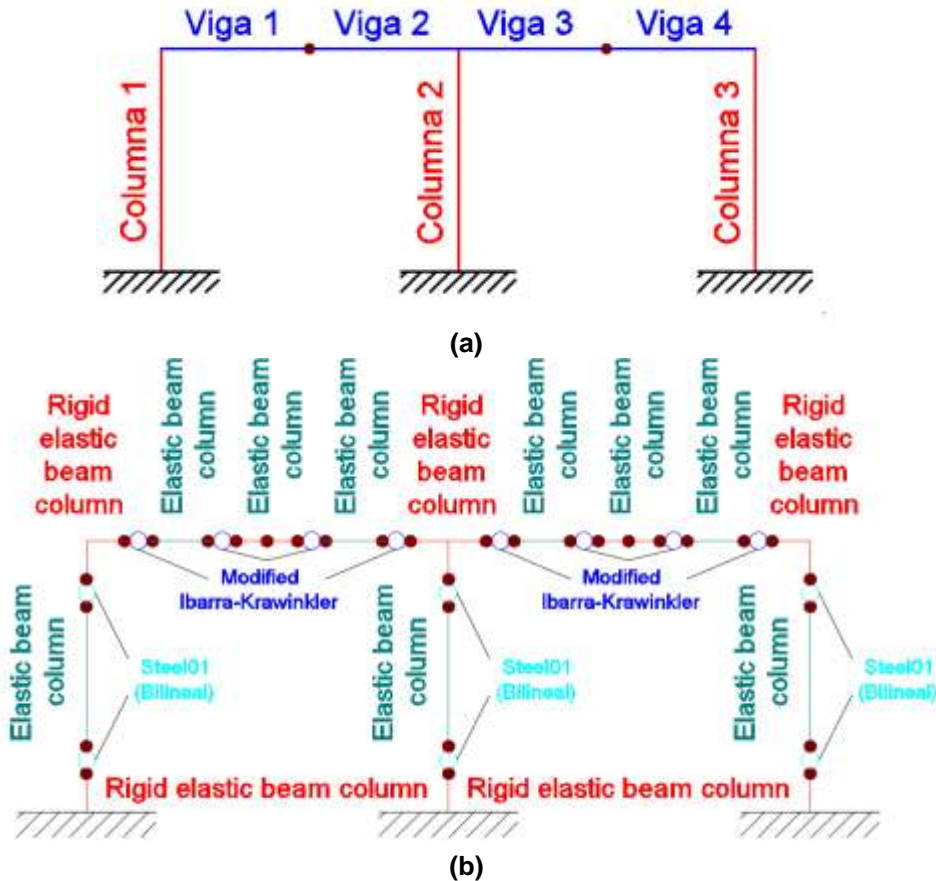
**Figura 11** a) Código para dibujar las estructuras; b) Identificación de nudos y elementos; c) Grados de libertad para el análisis en **CEINCI-LAB**.

## 4. MODELO CON ZONA DE PLASTICIDAD CONCENTRADA DE OPENSEES

Para el análisis Pushover no lineal en OpenSees de este artículo se trabaja con un modelo de plasticidad concentrada, por ello es necesario generar un modelo con la ubicación de las zonas de plasticidad concentrada asignando las propiedades de no linealidad de cada sección. Ibarra *et al.* (2005)

Para explicar este modelo se muestra un pórtico de 2 vanos y 1 piso, donde se tiene 3 columnas y 4 vigas, considerando que en cada vano existen 2 vigas de igual longitud. La generación del nudo en el medio del vano es útil para incluir elementos diagonales de acero o disipadores de energía como TADAS o

ADAS. Luego cada columna y cada viga mostrada en la figura 12a es dividida en 5 partes como se muestra en la siguiente figura 12b donde a los extremos se tiene: elementos rígidos luego una rótula plástica de longitud nula seguido de un elemento elástico. Lignos y Krawinkler (2007, 2009, 2011), Lignos *et al.* (2011).

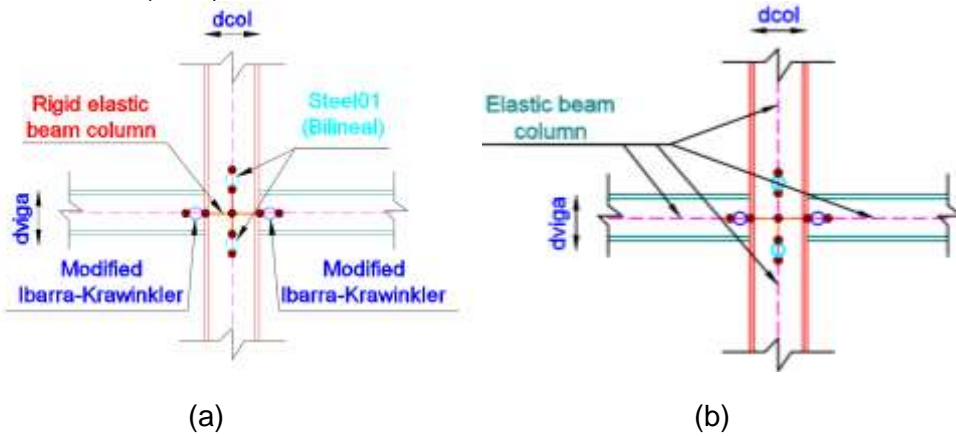


**Figura 12** a) Modelo generado en **CEINCI-LAB** b) Modelo para el análisis Pushover no lineal en OpenSees.

En el modelo mostrado anteriormente se tiene 4 materiales de los elementos vigas-columnas y son: elemento rígido; zona de daño o de plasticidad concentrada para las columnas de acero; zona de daño para viga; elemento elástico. En este análisis Pushover desarrollado en OpenSees se considera conveniente asignar en las zonas de plasticidad concentrada modelos bilineales, para columnas de acero con el material denominado **Steel01** y para vigas se emplea el modelo denominado **Ibarra-Medina-Krawinkler**; existe un tramo del elemento que presentará un comportamiento elástico con el material **Elastic beam column**. Estos materiales se estudiarán más adelante y se revisará los factores de modificación de rigidez para el análisis de la estructura.

En la figura 13 se puede visualizar la ubicación de las zonas de plasticidad concentrada. Las zonas de plasticidad concentrada de las vigas se colocaron en las caras de la columna. Es decir, a una distancia de la mitad del ancho de las

columnas desde la línea central de la columna. Además, se colocaron las zonas de plasticidad concentrada en columnas a una distancia de la mitad del ancho de la viga desde la línea central de la viga, como se lo realiza en el reporte de Shoma y Constantinou (2017).



**Figura 13** a) Zonas de plasticidad concentrada en vigas y columnas e identificación de la zona rígida del elemento; b) Elementos elásticos.

#### 4.1 Elemento elástico

Las columnas y vigas se modelan como elementos elásticos (Elastic beam column), en la zona central, donde los esfuerzos son directamente proporcionales a las deformaciones, como se muestra en la figura 14.

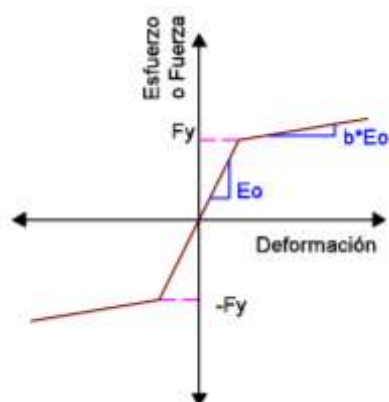


**Figura 14** Modelo de elementos elástico (comportamiento lineal).

#### 4.2 Modelo bilineal para zonas de plasticidad concentrada en columnas

El modelo para el comportamiento no lineal de columnas es sencillo de entender, es un modelo bilineal con una rigidez elástica hasta un esfuerzo o fuerza denominado de fluencia y una zona de post fluencia posterior a ese nivel de sollicitación; este modelo generalmente se lo conoce como elastoplástico y en OpenSees se puede modelar con el comando **steel01**.

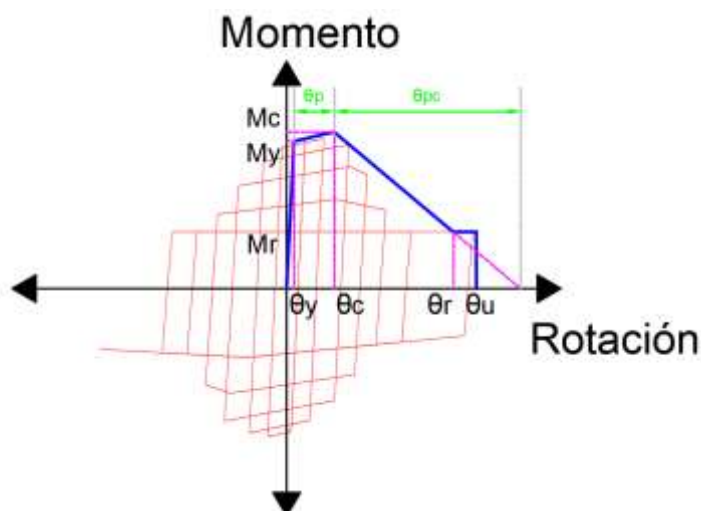




**Figura 15** Modelo Elasto-plástico para las articulaciones que se pueden formar en la columna.

#### 4.3 Modelo de Ibarra-Medina-Krawinkler para zonas de plasticidad concentrada en vigas

Este modelo es más complejo que los indicados anteriormente, ya que tiene relación con la degradación de resistencia del material, la curva constitutiva del modelo se indica en la figura 16. En este artículo se realiza un análisis Pushover monótonico, es decir que no existe un efecto reversible de la carga y por ello el modelo Ibarra-Medina-Krawinkler desprecia el efecto cíclico en el diagrama momento – rotación, como la línea en azul de la figura 16.

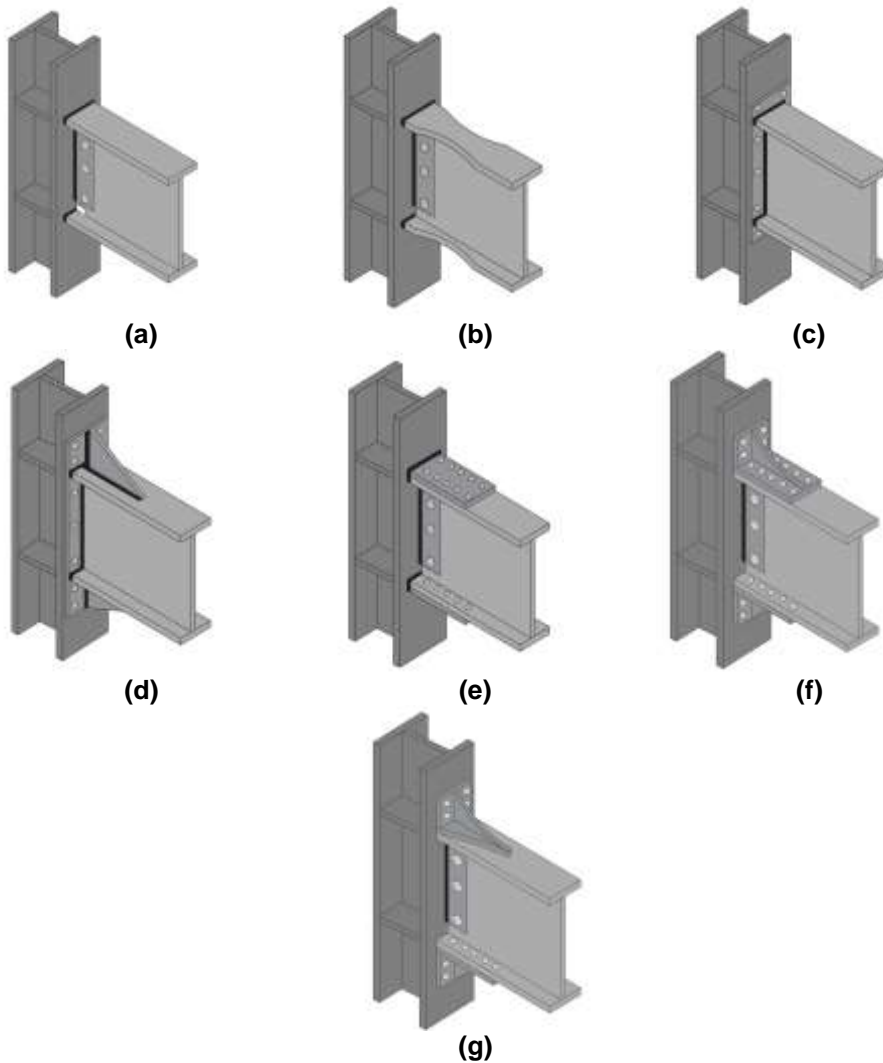


**Figura 16** Modelo Momento-Rotación de Ibarra-Medina-Krawinkler.

En **CEINCI-LAB**, se han presentado modelos constitutivos de acero para zonas de plasticidad concentrada en base a las recomendaciones del ASCE/SEI 41. En Aguiar *et al.* (2015), Mora y Aguiar (2015, 1), se describe el procedimiento de cálculo para el diagrama de momento-rotación de la sección W 30x99, en este caso se presentarán las ecuaciones necesarias para desarrollar este diagrama en base al modelo de Ibarra-Medina-Krawinkler, que se abrevia como IMK.



Las expresiones necesarias para determinar los parámetros del modelo momento-rotación IMK dependen de la conexión que existe en las vigas con las columnas; de las conexiones precalificadas en el AISC 358 se tiene:



**Figura 17** (a) Conexión de Patín Soldado Sin Refuerzo y Alma Soldada (WUF-W); (b) **Conexión de Sección de Viga Reducida (RBS)**; (c) Conexión de Placa Extrema Empernada Sin Rigidizar (BUEP) y (d) rigidizada (BSEP); (e) Conexión de Placa Empernada (BFP); (f) Conexión Kaiser con Soporte Atornillado y (g) Soldado (KBB).

En las siguientes ecuaciones se requiere ingresar el valor de  $F_y$  en unidades de Megapascal y para parámetros de longitud debe utilizarse milímetros, en estos casos los coeficientes  $c_{unit1}$  y  $c_{unit2}$  son 1. La relación de  $M_c / M_y$  es, en promedio, 1.10.

▪ **Conexión viga-columna diferente a la RBS:**

La rotación que existe en el rango de fluencia se determina en base a la ecuación 3 y la rotación en el rango de post fluencia con la ecuación 4.

$$\theta_p = 0.0865 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.365} \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.14} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.34} \cdot \left(\frac{c_{unit}^1 \cdot d}{533}\right)^{-0.721} \cdot \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{355}\right)^{-0.23} \quad (3)$$

$$\theta_{pc} = 5.63 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.565} \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.8} \cdot \left(\frac{c_{unit}^1 \cdot d}{533}\right)^{-0.28} \cdot \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{355}\right)^{-0.43} \quad (4)$$

Donde  $\theta_p$ , es la rotación plástica pre-capping (rad);  $\theta_{pc}$ , es la rotación plástica post-capping (rad);  $d$ , altura total de la viga (mm);  $h$ , es la altura del alma de la viga (mm);  $t_w$ , es el espesor del alma de la viga (mm);  $b_f$ , es el ancho del patín de la viga (mm);  $t_f$ , es el espesor del patín de la viga (mm);  $L$ , es la longitud de la viga (mm);  $F_y$ , es el esfuerzo de fluencia (MPa);  $c_{unit}^1=1$ ;  $c_{unit}^2=1$ .

▪ **Conexión viga-columna RBS:**

De manera similar al caso de vigas con conexión diferente a la RBS, se tiene la ecuación 5 y 6 para determinar la rotación que existe en el rango de fluencia y de post fluencia respectivamente.

$$\theta_p = 0.19 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.314} \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.10} \cdot \left(\frac{L_b}{r_y}\right)^{-0.185} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.113} \cdot \left(\frac{c_{unit}^1 \cdot d}{533}\right)^{-0.76} \cdot \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{355}\right)^{-0.07} \quad (5)$$

$$\theta_{pc} = 9.52 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.513} \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.863} \cdot \left(\frac{L_b}{r_y}\right)^{-0.108} \cdot \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{355}\right)^{-0.36} \quad (6)$$

Algunos términos de las ecuaciones fueron descritos previamente, restando indicar:  $L_b$ , que es la longitud de la viga sin arriostamiento (mm);  $r_y$  es el radio de giro en (mm). Por otra parte, se debe cumplir:

$$\frac{L_b}{r_y} \leq 70 \quad (7)$$

Para el modelo IMK en vigas se puede entender de manera conservadora que el valor de  $M_y$  es el producto del módulo plástico de la sección por el esfuerzo de fluencia del material, sin embargo, cuando se emplean conexiones precalificadas este valor puede ser multiplicado por un factor que toma en cuenta el endurecimiento por deformación denominado  $C_{pr}$ , siendo este valor calculado con la siguiente ecuación.

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2 \cdot F_y}; \quad C_{pr} \leq 1.2 \quad (8)$$

Donde  $F_y$ , es el esfuerzo de fluencia del material (ksi);  $F_u$ , es el esfuerzo último del material (ksi).

El valor de la rotación donde termina el rango elástico se denomina  $\theta_y$ , este valor puede ser calculado en base a la ecuación del ASCE/SEI 41, como:

$$\theta_y = \frac{M_p \cdot L}{6 \cdot E \cdot I_y} \quad (9)$$

Donde,  $M_p$  es el momento plástico (T.m);  $L$  es la longitud de la viga en (m);  $E$ , es el módulo de elasticidad del material;  $I_y$ , es el momento de inercia de la sección respecto al eje de giro (m<sup>4</sup>).

Para calcular el momento residual,  $M_r$ , se recomienda utilizar la relación de la ecuación 10.

$$\frac{M_r}{M_y} = 0.4 \quad (10)$$

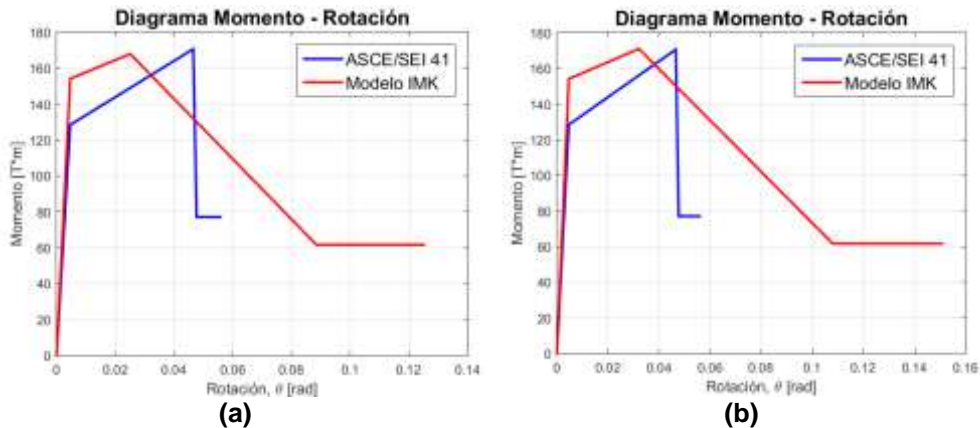
Se genera un programa para comparar los modelos de momento rotación de IMK con el ASCE/SEI 41, este programa forma parte de **CEINCI-LAB** y se denomina **Momento\_Rotacion\_Curvatura\_ASCE41\_Acero\_BCG.m**

Un fragmento de los datos de este programa se presenta en la figura 18, en esta parte se requiere datos del material como, módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia del acero y esfuerzo último, además, de la longitud de la viga y la estimación de la longitud plástica de la sección.

<b>Momento_Rotacion_Curvatura_ASCE41_Acero_BCG.m</b>
<pre> % Materiales Ey=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2 fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2 fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2 L = 7.315; % Longitud, m Lp=0.15; % Longitud plástica, m  %.....W30x99  Viga d = 754.38; % Peralte, mm tw = 13.208; % Espesor del alma, mm bs = 267.7; % Patín superior, mm bi = 267.7; % Patín inferior, mm tfs = 17.018; % Espesor patín superior, mm tfi = 17.018; % Espesor patín inferior, mm </pre>

**Figura 18** Datos para Momento – Rotación modelos ASCE/SEI 41 y IMK.

Para una sección W30x99, los modelos momento rotación se presenta en la figura 19. En este caso es evidente que los modelos del ASCE/SEI 41 difieren del modelo IMK, siendo más conservador el modelo del ASCE/SEI 41.



**Figura 19** a) Momento-Rotación con conexión RBS; b) Momento-Rotación con conexión diferente que RBS.

Para el pórtico en este modelo se asume que la conexión de la viga a la columna es RBS, los valores de las variables “DP, DN,  $\theta_{pP}$ ,  $\theta_{pN}$ ,  $\theta_{pcP}$ ,  $\theta_{pcN}$ ” se presentarán más adelante para las zonas de plasticidad concentrada en las vigas con el modelo de Ibarra-Medina-Krawinkler.

Donde DP, es tasa de deterioro cíclico en la dirección de carga positiva; DN, es tasa de deterioro cíclico en la dirección de carga negativa; DP y DN son parámetros que se utilizan para crear un comportamiento histéretico asimétrico;  $\theta_{pP} = \theta_p$ , es la rotación en el rango de fluencia en el caso positivo (rad);  $\theta_{pN} = \theta_p$ , es la rotación en el rango de fluencia en el caso negativo (rad);  $\theta_{pcP} = \theta_{pc}$ , es la rotación en el rango de post fluencia en el caso positivo (rad);  $\theta_{pcN} = \theta_{pc}$ , es la rotación en el rango de post fluencia en el caso negativo (rad).

#### 4.4 Modificación de rigidez de los elementos en el análisis con OpenSees

En este modelo de plasticidad concentrada cada elemento, viga o columna, es considerado como un elemento elástico, conectado en serie por zonas de plasticidad concentrada como se muestra en la figura 20.



**Figura 20** Distribución de rigidez en un elemento.

Acorde a la tesis de Barrera (2018), las propiedades estructurales de cada miembro son una combinación de propiedades de tres subelementos; estos elementos son, las zonas de plasticidad concentrada en los extremos con propiedades no lineales y del elemento viga o columna con propiedades elásticas. Sin embargo, para mantener la rigidez equivalente del conjunto de forma consistente con la rigidez del elemento verdadero es necesario modificar la rigidez de estos subelementos.

El modelo idealizado en la figura 20, muestra que la rigidez de cada subelemento se puede relacionar con la rigidez de un elemento de la siguiente manera:

$$\frac{1}{K_{elem}} = \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_{bc}} \quad (11)$$

Además, la rigidez rotacional de un elemento sometido a doble curvatura se puede determinar por:

$$K_{elem} = \frac{6 \cdot E \cdot I_y}{L_{elem}} \quad (12)$$

Con el propósito de resolver la ecuación de rigidez en serie de los subelementos que conforman a cada miembro y para evitar problemas de inestabilidad inelástica numérica, los autores Ibarra y Krawinkler proponen usar modelos con zona de plasticidad concentrada con una rigidez “n” veces mayor que la rigidez rotacional del elemento elástico (Ibarra & Krawinkler, 2005), generalmente se emplea valores de n cercanos a 10.

De esta forma, la rigidez elástica de las zonas de plasticidad concentrada ( $K_s$ ) y del elemento elástico ( $K_{bc}$ ) deben ser modificadas por este valor n, considerando las siguientes ecuaciones:

$$K_{bc} = \frac{n + 1}{n} \cdot K_{elem} \quad (13)$$

$$K_s = (n + 1) \cdot K_{elem} \quad (14)$$

## 5. DATOS PARA OPENSEES GENERADOS POR CEINCI-LAB

Se debe ingresar datos del material y secciones para el Pushover, se asigna las propiedades como se indica en el siguiente fragmento del programa:

### Código del programa principal, parte 4:

```

%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2
Cpr=(Fy+Fu)/(2*Fy); % Factor que toma en cuenta la resistencia máxima de la
conexión.
if Cpr < 1.2
    Cpr=Cpr;
else
    Cpr =1.2;
End

%% Secciones de los elementos, Columna % W30x173

```

```

Zx = 0.0098;
Acol = 0.0326;
Icol = 0.0034;
Mycol =Fy*Zx*Cpr;
d_col= 773.2 / 1000.0;

% Viga % W30x99
Zx = 0.0051;
Abeam = 0.0186;
Ibeam = 0.0017;
Mybeam = Fy*Zx*Cpr;
d_beam = 754.4 / 1000.0;

% Valores para zonas de daño del Modelo IMK
DP= 0.886; % rate of cyclic deterioration for pos loading
DN= 0.886; % rate of cyclic deterioration for neg loading
th_pP= 0.0204; % plastic rot capacity for pos loading
th_pN= 0.0204; % plastic rot capacity for neg loading
th_pcP= 0.1001; % post-capping rot capacity for pos loading
th_pcN= 0.1001; % post-capping rot capacity for neg loading

```

**Figura 21** Código del programa principal, parte 4.

Por facilidad en este primer programa, las vigas y columnas son de sección única, la sección de columnas es W30x173 y las vigas W30x99, para cumplir con este propósito se emplea la función denominada **[Seccion]=Unica\_Vg\_COL(nudt, coseno, Acol, Icol, Abeam, Ibeam)**; los datos que requiere son número total de vigas más columnas **nudt**, el área de la sección transversal e inercia de la sección de columnas **Acol** e **Icol**, de igual modo respecto a la sección de las vigas **Abeam**, **Ibeam** y con ello se genera una matriz denominada **Sección**. La matriz Sección ya se manejaba anteriormente en programas de CEINCI-LAB. Adicionalmente se determina la matriz de rigidez total de la estructura, el periodo de vibración y propiedades dinámicas de la estructura como modos de vibración y factores de participación modal.

#### Código del programa principal, parte 5:

```

%% Propiedades dinámicas
[Seccion]=Unica_Vg_COL(nudt,coseno,Acol,Icol,Abeam,Ibeam);
[ELEM]=gelem_portico(Seccion);
[K]=krigidez_acero(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC,Es);
KTT=K; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (T/m)
na=np;
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
[T,fi,OM]=orden_eig(KL,MASA);

% Factores de participacion modal
b=ones(np,1);
for i=1:np

```

```

maxfi=max(abs(fi(:,i)));
fi(:,i)=fi(:,i)/maxfi;
end
for i=1:np
    FP(:,i)=abs(((fi(:,i))*MASA*b)/((fi(:,i))*MASA*(fi(:,i))));
end

```

Figura 22 Código del programa principal, parte 5.

Regresando al pórtico de análisis de 6 pisos mostrado en la figura 4, es necesario generar un modelo con la división de los elementos en las partes correspondientes como se indica en la figura 12.

Para el modelo de OpenSees se requiere nuevos nudos, coordenadas X, Y e identificación de los nudos iniciales y finales que componen a cada elemento, a más de ello es necesario identificar las secciones que se deben asignar a cada elemento. Se genera la función **[Tabla\_Elem\_Nud, nod, X, Y]=ElementosNudos(nudt, nudcol, nod, NI, NJ, X, Y, d\_col, d\_beam)**; en este caso la matriz Tabla\_Elem\_Nud contiene la información relevante de nudos y elementos. Generando un modelo como se indica en la figura 23.

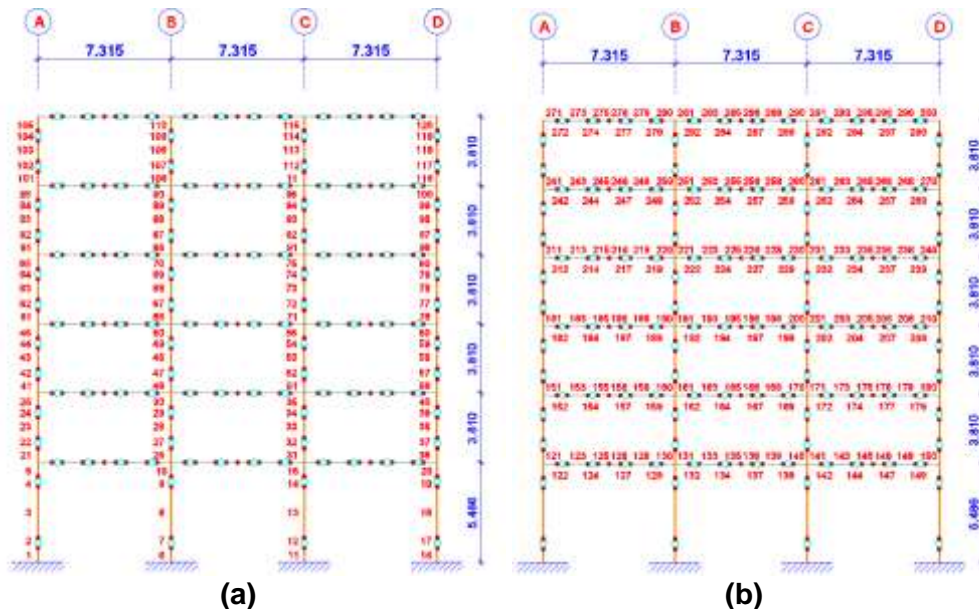


Figura 23 a) Numeración de elementos columnas; b) Numeración de elementos vigas.

En este nuevo modelo se puede visualizar 300 elementos, es por ello que la matriz denominada **Tabla\_Elem\_Nud** tiene 300 filas donde cada una de ellas corresponde a un elemento. Esta matriz tiene 4 columnas donde la primera es una etiqueta, es decir el primer número corresponde al elemento original (figura 11a) seguido de 2 ceros y el último número, del 1 al 5, representa el segmento del elemento que fue dividido (figura 12b); la columna 2 y 3 corresponde al nudo inicial

y final de cada nuevo elemento, la columna 4 es una etiqueta para identificar el tipo de propiedad que corresponde a cada elemento. La etiqueta de la columna 4 puede ser 0 para elementos rígidos (misma propiedad que un elemento elástico, pero con área e inercia multiplicada por 10), luego 1 para elementos elásticos, 2 para zonas de plasticidad concentrada con propiedades de un elemento bilineal steel01 y 3 para las zonas de plasticidad concentrada de vigas con propiedad del modelo Ibarra-Medina-Krawinkler.

	1	2	3	4
1	1001	1	47	0
2	1002	47	48	2
3	1003	48	49	1
4	1004	49	50	2
5	1005	50	5	0
6	2001	2	51	0
7	2002	51	52	2
8	2003	52	53	1
9	2004	53	54	2
10	2005	54	7	0

**(a)**

	1	2	3	4
121	25001	5	143	0
122	25002	143	144	3
123	25003	144	145	1
124	25004	145	146	3
125	25005	146	6	1
126	26001	6	147	1
127	26002	147	148	3
128	26003	148	149	1
129	26004	149	150	3
130	26005	150	7	0

**(b)**

**Figura 24** Fragmento de Tabla\_Elem\_Nud a) Primeras 2 columnas (elementos 1 y 2 de figura 11a) b) Primeras 2 vigas (elementos 25 y 26 de figura 11a).

Un fragmento del programa se detalla en la figura 25, en el cual se puede notar una nueva función denominada **Pushover\_OpenSees()**, que se presenta de color rojo para distinguirla, en este caso no existen datos de ingreso y salida debido a que esta rutina trabaja con variables globales definidas al inicio del programa. Sin embargo, al ejecutarse esta línea se genera un archivo con extensión TCL cuyo nombre es **Estructura\_Pushover.tcl**.

#### Código del programa principal, parte 6:

```

%% Elementos y nudos
[Tabla_Elem_Nud,nod,X,Y]=ElementosNudos(nudt,nudcol,nod,NI,NJ,X,Y,d_col,d_
beam);
NI=Tabla_Elem_Nud(:,2)';
NJ=Tabla_Elem_Nud(:,3)';
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_elem=nudt*5;
HBuilding=max(Y);

%% Nudos con grados de libertad iguales
[DOF]=MismosGDL(nod,np,Xcol,Ypisos,X,Y);

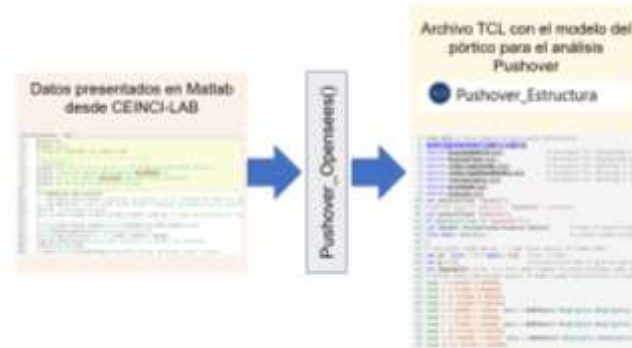
Pushover_OpenSees()

```

**Figura 25** Código del programa principal, parte 6.



En la figura 26 se puede visualizar el funcionamiento de la función **Pushover\_OpenSees()**, los datos de ingreso corresponden al código generado hasta este punto en CEINCI-LAB y como salida se tiene un archivo con el modelo en lenguaje TCL. Mas adelante se presentará un detalle de los modelos de transformación geométrica de los elementos estructurales empleados.



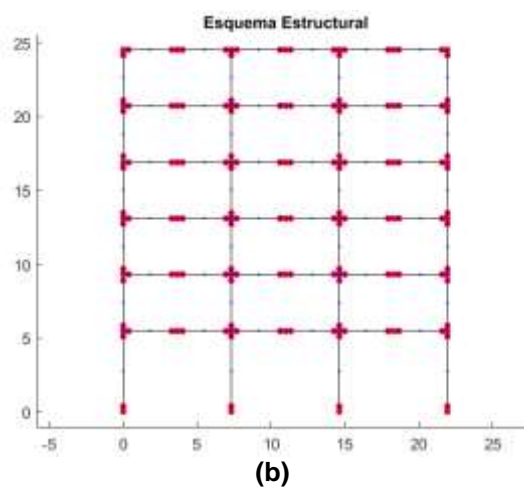
**Figura 26** Diagrama de proceso de la función **Pushover\_OpenSees()**

Como una forma de verificar gráficamente el modelo generado hasta este punto se puede elaborar los dibujos del pórtico en análisis, en este caso la función **dibujoNudElemMODPUSH(X,Y,NI,NJ)** presenta un gráfico como se muestra en la figura 27b, en el cual se incluyen los nudos y elementos columnas y vigas que componen al pórtico, con una distribución similar a la presentada en la figura 23.

#### Código del programa principal, parte 7:

```
%% Dibujos
dibujoNudElemMODPUSH(X,Y,NI,NJ)
```

(a)



(b)

**Figura 27** a) Código del programa principal, parte 7. b) Modelo de vigas y columnas generado en CEINCI-LAB.

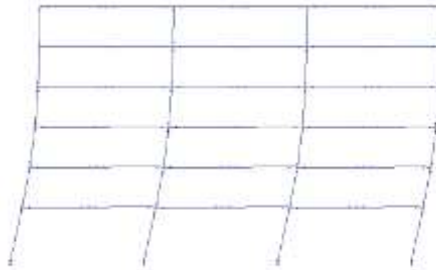
El archivo **Estructura\_Pushover.tcl** que se genera en la carpeta que se está almacenando el programa en MATLAB, es ejecutado posteriormente por OpenSees y genera los cálculos necesarios para el Pushover, la línea que indica esta acción se muestra a continuación, donde el comando empieza con un signo de admiración (!) luego se escribe **OpenSees.exe** seguido por el nombre del archivo tcl que describe el modelo, en este caso **Pushover\_Estructura.tcl**

**Código del programa principal, parte 8:**

```
%% Análisis Pushover
! OpenSees.exe Pushover_Estructura.tcl
```

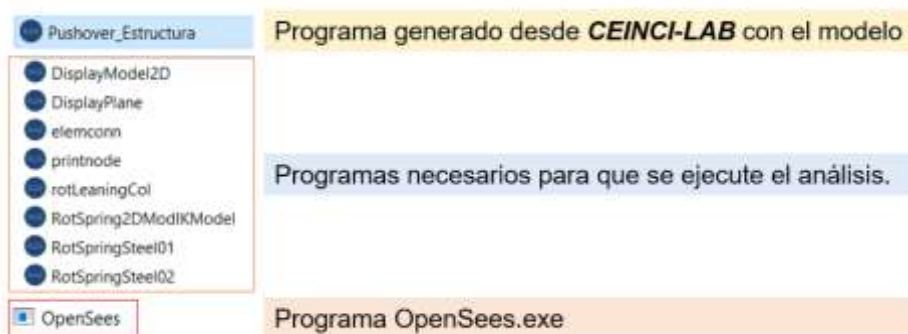
**Figura 28** Código del programa principal, parte 8.

Finalmente, al ejecutarse OpenSees desde Matlab se generan los cálculos del Pushover del modelo propuesto y aparece una ventana emergente con la simulación del análisis como se muestra en la figura 29.



**Figura 29** Ventana con la simulación del análisis Pushover en OpenSees.

Para que el análisis se desarrolle de forma correcta, en la carpeta junto al programa **Pushover\_Estructura.tcl** se debe encontrar los archivos con los modelos de materiales y tipos de elementos, a más de los programas con extensión **(.tcl)** necesarios para el análisis de OpenSees.exe, es decir los archivos que se muestran en la figura 30 (estos programas serán almacenados en los perfiles de ResearchGate de los autores cuando se publique el artículo).



**Figura 30** Programas necesarios para que se ejecute el análisis en OpenSees.

Los resultados del análisis Pushover se almacenan en una carpeta que es generada de forma automática por OpenSees, esta carpeta tiene por nombre **Concentrated-Pushover-Output** y almacena en este caso 5 archivos de texto con extensión **.out**, estos archivos son Desplazamiento en el tope **Disp\_Roof**, y para cada nudo de la base se genera un archivo denominado **Vbase#** con información del cortante experimentado como reacción ante las cargas laterales aplicadas.

La función **Graficar\_Pushover2.m** es la que genera la gráfica con desplazamiento en el tope y cortante basal, es decir la curva del análisis Pushover, como se muestra en la figura 31b. La metodología para determinar el desplazamiento efectivo de fluencia  $\delta_{y_{eff}}$  y desplazamiento último  $\delta_u$  es la que se presenta en el FEMA P695, donde el desplazamiento último es el valor de desplazamiento para el cual se ha tenido una pérdida del 20% de resistencia, es decir el valor para el cual el cortante baja a  $0.8 \cdot V_{m\acute{a}x}$ . El desplazamiento efectivo de fluencia se puede calcular en base a la ecuación 15.

$$\delta_{y_{eff}} = \Gamma_1 \cdot \frac{V_{m\acute{a}x}}{W} \cdot \left( \frac{g}{4 \cdot \pi^2} \right) \cdot T_1^2 \quad (15)$$

Donde  $\Gamma_1$  es el factor de participación modal del primer modo de vibración bajo condiciones elásticas;  $T_1$  es el periodo fundamental de vibración de la estructura;  $g$  es la gravedad;  $V_{m\acute{a}x}$  es el cortante máximo del análisis Pushover;  $W$  es la carga reactiva total del sismo.

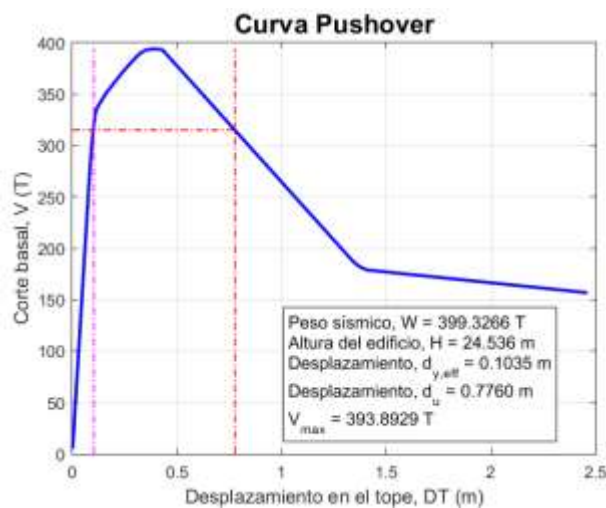
#### Código del programa principal, parte 9:

```
%% Gráfica Pushover
```

```
Tfundamental=textread('Resultados_Modal/Periodo_Fundamental.out');
```

```
[Vbase,DT]=Graficar_Pushover2(nr,WBuilding,HBuilding,FP,Tfundamental);
```

(a)



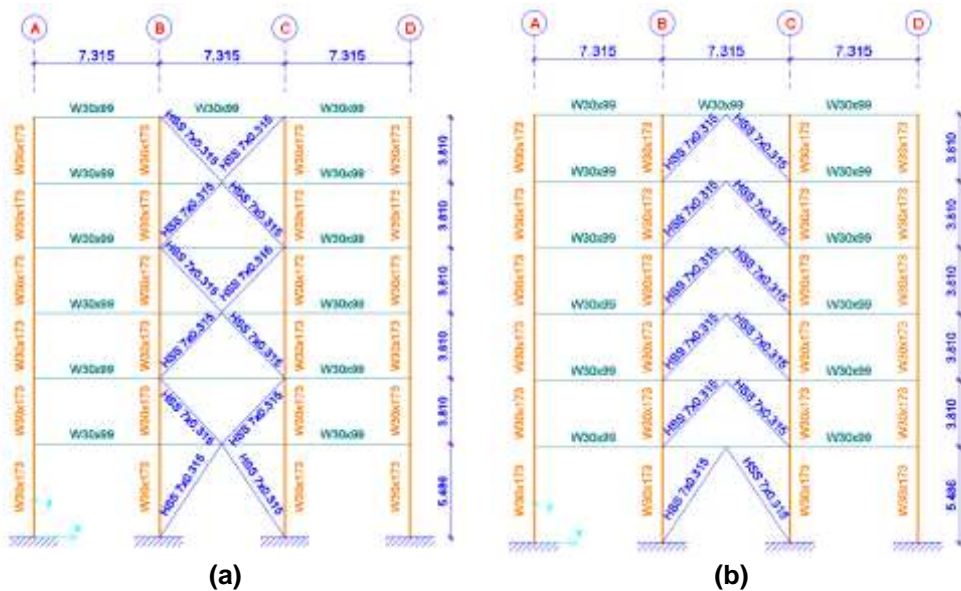
(b)

**Figura 31** a) Código del programa principal, parte 9. Curva Pushover generada por CEINCI-LAB mediante el acoplamiento con OPENSEES (Distribución de cargas en función del 1<sup>er</sup> modo de vibración).

## 6. REFORZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE DIAGONALES DE ACERO

Muchas veces los pórticos de acero, como el presentado en la figura 4, son reforzados con diagonales de acero con el propósito de aumentar la rigidez y resistencia ante solicitaciones sísmicas.

Las configuraciones de las diagonales de acero habituales en Ecuador para el reforzamiento de estructuras son las denominadas en forma de “V invertida” o “X de múltiples pisos”. A continuación, se presentará la metodología para realizar el análisis estático no lineal (Pushover) de las estructuras con diagonales de acero presentadas en la figura 32. En el vano central se colocará diagonales de acero circulares HSS7x0.315, cuyas dimensiones son 18cm (aprox. 7 pulgadas) de diámetro exterior y 8mm (0.315 pulgadas) de espesor.



**Figura 32** a) Estructura con diagonales en V invertida; b) Estructura con diagonales en X de múltiples pisos.

## 7. DATOS PARA CEINCI-LAB INCLUYENDO DIAGONALES

Al inicio del programa se debe declarar variables globales, en este caso existen nuevas variables, adicionales a las previamente ingresadas, entre ellas:

### Código del programa principal, parte 1b:

```
global nod_Diag X_Diag Y_Diag NI_Diag NJ_Diag Abrace lbrace num_Diag
Tabla_Elem_Nud_Diag
global Fy_brace Es_brace Dis_Fuerzas_Laterales T W fi
```

**Figura 33** Código del programa principal, parte 1b.

Para definir la geometría del pórtico conformada por columnas y vigas se presentó una metodología que requería de los vectores **sv** y **sp**, para la separación de vanos y la altura de cada uno de los pisos Aguiar *et al.* (2019). A continuación, se debe incluir datos de los marcos en los cuales se va a colocar las diagonales en forma de V invertida y en forma de V para el modelo con X de múltiples pisos. Por facilidad se debe numerar los marcos como se muestra en la figura 3, empezando en 1 desde la esquina inferior izquierda hacia la derecha, hasta el último marco del piso 1, luego en los siguientes niveles se continua con la numeración en el mismo sentido. Para la elaboración de la figura 3 se puede emplear la función de CEINCI-LAB denominada **dibujovanos(sv, sp)** presentada en Herrera *et al.* (2019).

Para la generación del modelo con V invertidas de la figura 32a, se debe incluir el vector **mar**, este vector debe contener el número del marco en cual se colocarán dichas diagonales. Posteriormente se debe definir el nudo inicial y final de los elementos diagonales con la rutina **geometría\_nudo\_diagonales** y combinar los vectores con la geometría de los elementos totales, las funciones diferentes al programa del modelo sin refuerzo se han marcado de color rojo para que sea fácil identificarlas y aplicar en los programas de los usuarios.

#### Código del programa principal, parte 2b:

```
%% Geometría del pórtico
sv =[7.315;7.315;7.315]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp =[5.486;3.81; 3.81; 3.81; 3.81; 3.81]; %Ingresar un vector con la altura de pisos
en (metros)
dibujovanos(sv,sp);
% Diagonales de acero, ubicación y propiedades de la sección
mar = [2;5;8;11;14;17];
%Para diagonales se calcula el área e inercia
diae=0.18; %Diámetro exterior
diai=0.18-8*2/1000; %Diámetro interior
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-1.8517]; % carga distribuida en vigas en
cada piso T/m
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); %Calcula los grados de libertad
[VC]=vc(NI,NJ,CG);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_COL_VG=length(L);
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
% .....
[GEN]=geometria_nudo_diagonales(nv, np, nudt, mar);
[NI2,NJ2]=gn_portico(GEN);
[NI_Diag,NJ_Diag]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
```

Figura 34 Código del programa principal, parte 2b.

Para la generación del modelo con X de múltiples pisos de la figura 32b, se debe incluir los vectores **mar2** y **marv**. Donde mar2, describe los marcos que tienen diagonales en forma de **V invertida** y marv los que tienen **diagonales en forma de V** para que al unir estos elementos se formen las X de varios pisos. En este caso la función a emplear es **geometría2\_nudo\_diagonales**, como se muestra a continuación en un fragmento del programa.

#### Código del programa principal, parte 2b:

```
%% Geometría del pórtico
sv =[7.315;7.315;7.315]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp =[5.486;3.81; 3.81; 3.81; 3.81; 3.81]; %Ingresar un vector con la altura de pisos
en (metros)
dibujovanos(sv,sp);
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-1.8517]; % carga distribuida en vigas en
cada piso T/m
% .....
mar2 = [2;8;14];
marv = [5;11;17];
%Para diagonales se calcula el área e inercia
diae=0.18; %Diámetro exterior
diai=0.18-8*2/1000; %Diámetro interior
% .....
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); %Calcula los grados de libertad
[VC]=vc(NI,NJ,CG);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_COL_VG=length(L);
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
% .....

[GEN]=geometria2_nudo_diagonales(nv, np, nudt,mar2,marv);
[NI2,NJ2]=gn_portico(GEN);
[NI_Diag,NJ_Diag]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
```

**Figura 35** Código del programa principal, parte 2b.

En estos modelos la aplicación de masas y distribución de cargas laterales se mantiene como en el modelo del pórtico sin reforzar, que se puede visualizar en la figura 4. Es posible numerar los elementos del modelo de CEINCI-LAB y los grados de libertad con las funciones **dibujoNudElem** y **dibujogdl**, para visualizar la geometría que se tiene hasta este punto con cada modelo (Figura 36), se debe indicar que para las funciones se requiere hacer referencia a **NI\_Diag** y **NJ\_Diag** que son los vectores que tienen los nudos inicial y final de cada elemento correspondientes a columnas, vigas y diagonales como se muestra en el siguiente fragmento de código de la figura 36a.



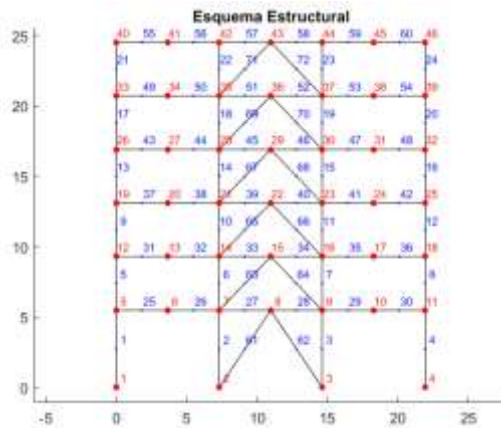
**Código del programa principal, parte 3b:**

```

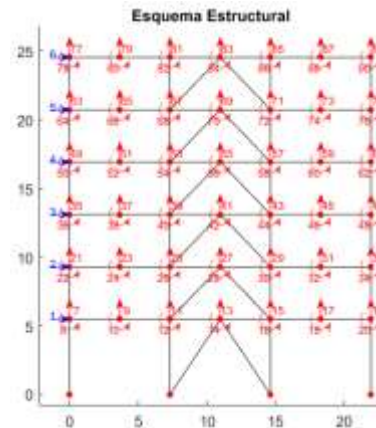
% Dibujos
dibujoNudElem(X,Y,NI_Diag, NJ_Diag,CG)
dibujogdl(X,Y,NI_Diag, NJ_Diag,CG)

```

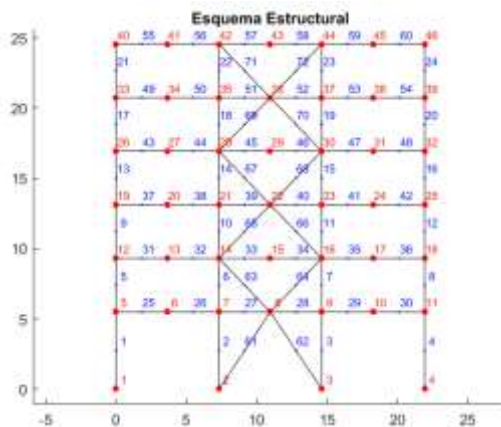
(a)



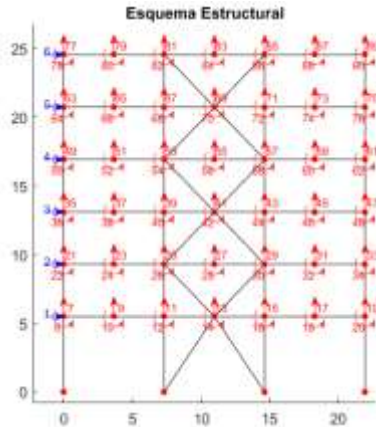
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 36** Estructura con diagonales en V invertida: a) Código del programa principal, parte 3b. b) Numeración de elementos; c) Grados de libertad. Estructura con diagonales en X de múltiples pisos: d) Numeración de elementos; e) Grados de libertad.

Para las propiedades de los elementos diagonales (brace), se deben incluir el módulo de elasticidad, el esfuerzo de fluencia del material que los conforman y calcular el área e inercia de estos elementos como se indica a continuación:

**Código del programa principal, parte 4b:**

```

[VC_Diag]=vc(NI_Diag,NJ_Diag,CG);
[L_Diag,seno_Diag,coseno_Diag]=longitud(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag); %long. de
@elem, seno y coseno
%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2
Fy_brace=Fy;
Es_brace=Es;
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2
Cpr=(Fy+Fu)/(2*Fy); % Factor que toma en cuenta la resistencia máxima de la
conexión.
    if Cpr < 1.2
        Cpr=Cpr;
    else
        Cpr=1.2;
    End
% Column section % W30x173
Zx = 0.0098;
Acol = 0.0326;
Icol = 0.0034;
Mycol =Fy*Zx*Cpr;
d_col= 773.2 / 1000.0;
% Brace section % Tcircular Diámetro de 18 cm y espesor de 8 mm
Abrace=pi*diae^2/4-pi*diai^2/4; % área
Ibrace=pi*diae^4/64-pi*diai^4/64; % inercia
% beam section % W30x99
Zx = 0.0051;
Abeam = 0.0186;
Ibeam = 0.0017;
Mybeam = Fy*Zx*Cpr;
d_beam = 754.4 / 1000.0;

% beam springs at Floor 2 # % W30x99
DP= 0.886; % rate of cyclic deterioration for pos loading
DN= 0.886; % rate of cyclic deterioration for neg loading
th_pP= 0.0204; % plastic rot capacity for pos loading
th_pN= 0.0204; % plastic rot capacity for neg loading
th_pcP= 0.1001; % post-capping rot capacity for pos loading
th_pcN= 0.1001; % post-capping rot capacity for neg loading

```

**Figura 37** Código del programa principal, parte 4b.

En CEINCI-LAB se puede calcular la matriz de rigidez lateral del pórtico con la contribución de los elementos de vigas y columnas de acero (KH), luego se suma la contribución de la rigidez de las diagonales de acero (KA). En el código presentado a continuación, el color azul representa las líneas adicionales de programación debido a las diagonales de acero y en rojo se muestra la suma de las matrices de rigidez.



**Código del programa principal, parte 5b:**

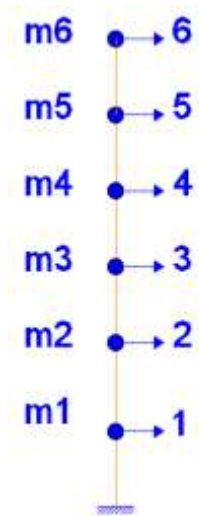
```

%% Propiedades dinámicas
[Seccion]=Unica_Vg_COL(nudt,coseno,Acol,lcol,Abeam,lbeam);
Seccion=[Seccion;
length(NI)+1 Abrace lbrace 11 1];
[ELEM]=gelem_portico(Seccion);
% Matriz de Rigidez de columnas y vigas
ELEMH=ELEM(1:length(NI),:);
[KH]=krigidez_acero(ngl,ELEMH,L,seno,coseno,VC,Es);
%Contribucion de elementos Diagonales de Acero
ELEMA=ELEM(length(NI)+1:end,:);
LA=L_Diag(length(NI)+1:end); senoA=seno_Diag(length(NI)+1:end);
cosenoA=coseno_Diag(length(NI)+1:end); VCA=VC_Diag(length(NI)+1:end,:);
num_Diag=length(LA);
Est = Es/10; % Módulo de elasticidad, (kg/cm2)
H=sp*100;
hci=d_col*100;hcd=d_col*100;hdis=0;Lon=sv(2,1)*100;hv=d_beam*100;
Kef=zeros(np,1);
for ie=1:np
[Kdiag(ie),Keq(ie)]=rigidez_equivalente_TADAS(hci,hcd,hdis,Lon,hv,H(ie),Kef
(ie),Abrace*10000,Est);
end
Kdiag=Kdiag/10; % Para tener en T/m
ELEM_T_Diag=[Kdiag(1);Kdiag(1);
Kdiag(2);Kdiag(2);
Kdiag(3);Kdiag(3);
Kdiag(4);Kdiag(4);
Kdiag(5);Kdiag(5);
Kdiag(6);Kdiag(6)];
[KA]=krigidez_tadas(num_Diag,ngl,ELEM_T_Diag,senoA,cosenoA,VCA);
%Rigidez de Diagonales
KTT=KH+KA; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (T/m)
na=np;
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
[T,fi,OM]=orden_eig(KL,MASA);
% Factores de participación modal
b=ones(np,1);
for i=1:np
maxfi=max(abs(fi(:,i)));
fi(:,i)=fi(:,i)/maxfi;
end
for i=1:np
FP(:,i)=abs(((fi(:,i))^2)*MASA*b)/((fi(:,i))^2*MASA*(fi(:,i))));
End
disp('Los periodos de vibración en segundos con CEINCI-LAB son:')
T % seg

```

**Figura 38** Código del programa principal, parte 5b.

El modelo de CEINCI-LAB para el análisis de un pórtico en dos dimensiones es un modelo simplificado de 1 grado de libertad (gdl) por piso, en las figuras 11c, 36c y 36e se puede visualizar los grados de libertad considerados y se indica de color azul la componente principal de los grados de libertad horizontales. Para el cálculo en CEINCI-LAB se debe realizar una condensación estática en los grados de libertad asociados a las componentes horizontales para generar el modelo simplificado. Este modelo para un pórtico de 6 pisos se presenta en la figura 39.



**Figura 39** Modelo simplificado de 1 gdl considerado en CEINCI-LAB para el análisis.

Para los 3 modelos del pórtico en análisis se ilustrará la matriz de rigidez lateral en unidades de T\*m. La estructura sin refuerzo es la denominada (EST<sub>1</sub>), con V invertidas (EST<sub>2</sub>) y con X de múltiples pisos (EST<sub>3</sub>):

$$KL\_EST_1 = \begin{bmatrix} 27390.7 & -21825.3 & 5152.3 & -698.9 & 81.8 & 51.5 \\ -21825.3 & 37610.0 & -23723.3 & 5407.7 & -738.8 & 120.0 \\ 5152.3 & -23723.3 & 37975.1 & -23765.2 & 5350.4 & -558.6 \\ -698.9 & 5407.7 & -23765.2 & 37933.7 & -23423.3 & 4484.4 \\ 81.8 & -738.8 & 5350.4 & -23423.3 & 35422.5 & -16679.5 \\ 51.5 & 120.0 & -558.6 & 4484.4 & -16679.5 & 12563.9 \end{bmatrix}$$

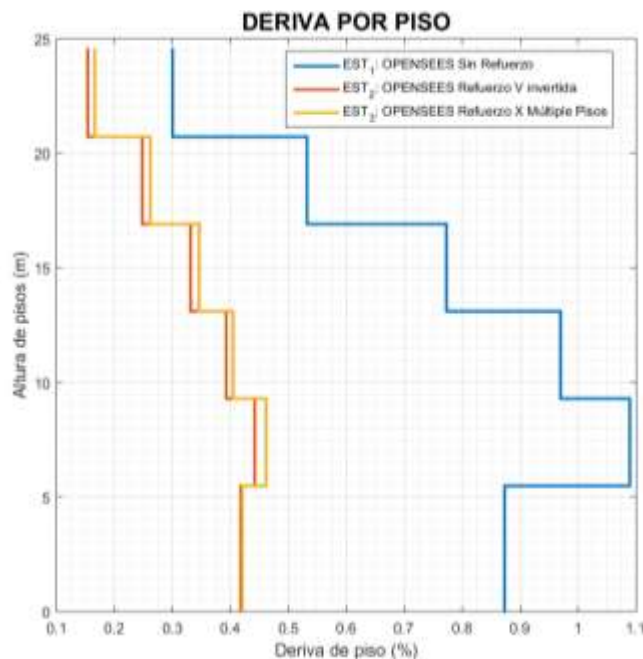
$$KL\_EST_2 = \begin{bmatrix} 52583.5 & -39240.2 & 5417.3 & -534.2 & 169.0 & 688.0 \\ -39240.2 & 71910.9 & -41317.0 & 5538.1 & -664.4 & 631.0 \\ 5417.3 & -41317.0 & 72221.2 & -41407.6 & 5441.4 & 77.2 \\ -534.2 & 5538.1 & -41407.6 & 72125.7 & -41111.6 & 5330.1 \\ 169.0 & -664.4 & 5441.4 & -41111.6 & 69585.7 & -33405.8 \\ 688.0 & 631.0 & 77.2 & 5330.1 & -33405.8 & 26658.0 \end{bmatrix}$$

$$KL\_EST_3 = \begin{bmatrix} 52164.1 & -39659.2 & 5956.3 & -707.7 & 328.8 & 1008.3 \\ -39659.2 & 73265.8 & -41548.5 & 5407.8 & -742.1 & 126.5 \\ 5956.3 & -41548.5 & 71282.3 & -41593.6 & 5681.6 & 656.4 \\ -707.7 & 5407.8 & -41593.6 & 73589.5 & -41254.9 & 4497.2 \\ 328.8 & -742.1 & 5681.6 & -41254.9 & 68343.5 & -32342.2 \\ 1008.3 & 126.5 & 656.4 & 4497.2 & -32342.2 & 26032.1 \end{bmatrix}$$

También se presenta la matriz de masas de las estructuras; para este caso se considera que es igual para los tres modelos.

$$MASA = \begin{bmatrix} 7.3128 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.3128 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7.3128 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.3128 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.3128 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.142 \end{bmatrix}$$

En este punto se hace un paréntesis al programa para generar el Pushover y con las matrices de rigidez y masa de cada estructura se puede generar un análisis modal espectral considerando el espectro de la NEC 15. El factor de reducción de fuerzas sísmicas  $R$ , se asume como 6; el tipo de suelo es D; la zona sísmica V y la región Sierra, en base a ello se obtiene las propiedades dinámicas de cada estructura y se cumple con el propósito de calcular las derivas de piso, en la figura 40 se presentan mencionadas derivas.



**Figura 40** Derivas de piso de la respuesta modal espectral.

La deriva de piso máxima que tiene la estructura sin refuerzo es de 1.1% en los pisos inferiores, sin embargo, al emplear las diagonales de acero como mecanismos de reforzamiento esta deriva disminuye hasta 0.45%, aproximadamente, es decir que disminuye a más de la mitad. No obstante, es importante notar que las diagonales en forma de V invertida o X de múltiples pisos aportan una rigidez lateral similar a la estructura y por ello sus derivas son similares en cada piso, al igual que los valores en la matriz de rigidez.

Los modelos de las diagonales de acero en forma de V invertida presentan la ventaja de generar espacios útiles en todos los pisos, mientras que las X de múltiples pisos limitan la funcionalidad de espacio en los pisos que se colocan diagonales en forma de V. A pesar de esta ventaja, el emplear diagonales de acero en forma de V invertida en todos los pisos genera otros problemas relacionados con un desbalance de fuerzas en el nudo medio de la viga, formando un cortante vertical muy grande que deberá ser absorbido por la viga y esta terminará fallando por flexión. Para contrarrestar el problema mencionado del desbalance de fuerzas se puede optar por diagonales en forma de X.

A continuación, en la figura 41 se muestra un fragmento del código para generar un modelo como el que se presenta en la figura 14, donde se divide a las vigas y columnas en 5 elementos, considerando los brazos rígidos, las zonas de plasticidad concentrada y los elementos elásticos.

#### Código del programa principal, parte 6b:

```
%% Elementos y nudos
[Tabla_Elem_Nud,nod,X,Y]=ElementosNudos(nudt,nudcol,nod,NI,NJ,X,Y,d_col,d_
beam);
% .....

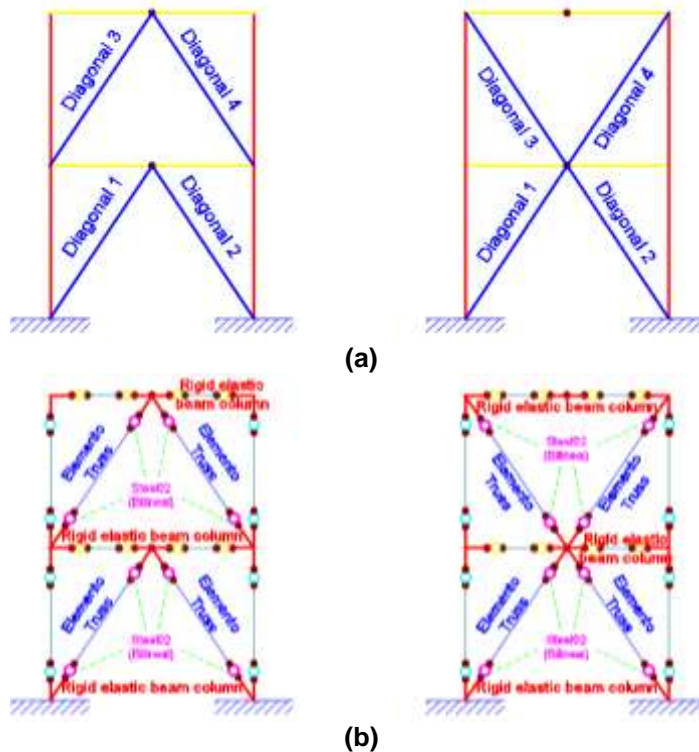
NI=Tabla_Elem_Nud(:,2);
NJ=Tabla_Elem_Nud(:,3);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_elem=nudt*5;
HBuilding=max(Y);
L_rig=0.6;
NI2=[zeros(1,length(NI)), NI2(1,end-num_Diag+1:end)];
NJ2=[zeros(1,length(NI)), NJ2(1,end-num_Diag+1:end)];
[NI_Diag,NJ_Diag]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
% .....
```

Figura 41 Código del programa principal, parte 6b.

## 8. MODELO CON ZONA DE PLASTICIDAD CONCENTRADA DE OPENSEES PARA DIAGONALES DE ACERO

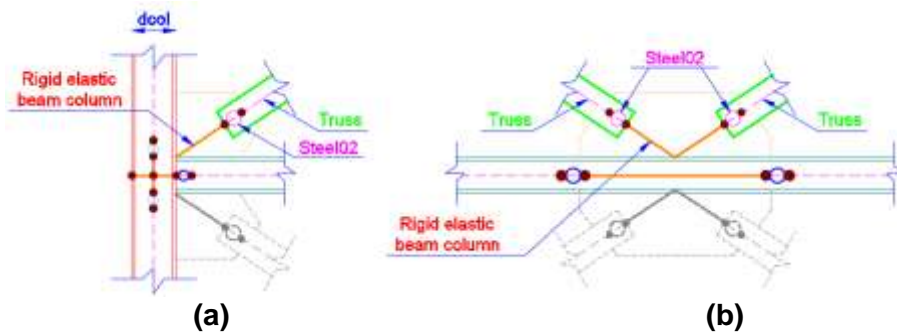
Este modelo considera plasticidad concentrada en las diagonales para el análisis Pushover no lineal en OpenSees, de manera similar al explicado en la sección 4 del presente artículo. Cada diagonal se divide en 5 partes como se muestra en la figura 42b, donde a los extremos se tiene elementos rígidos, luego

una rótula plástica de longitud nula, seguido de un elemento elástico de tipo armadura, es decir que trabaja a compresión y tracción.



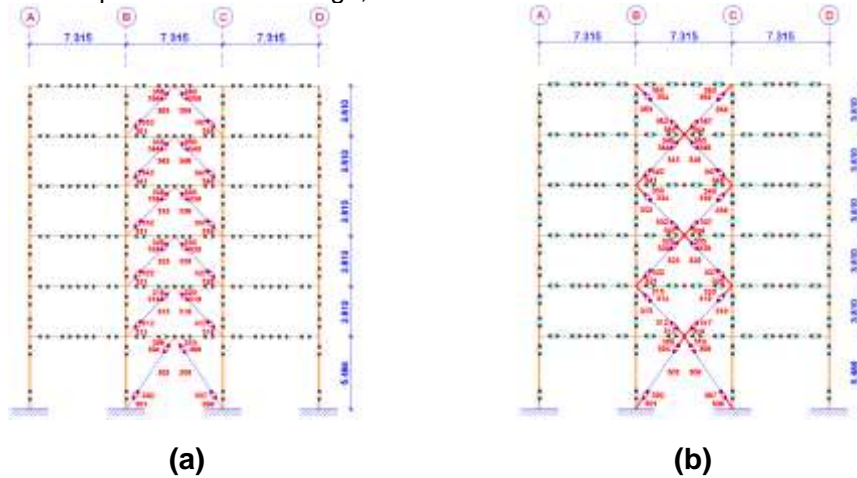
**Figura 42** a) Modelo generado en **CEINCI-LAB** b) Modelo para el análisis Pushover no lineal en OpenSees.

En el modelo mostrado anteriormente se tiene 3 materiales en los elementos diagonales de acero; en la figura 43 se puede visualizar la ubicación de las zonas de plasticidad concentrada. Estas zonas de plasticidad concentrada, de los elementos diagonales de acero, se formarán a una distancia  $L_{rig}$ .



**Figura 43** a) Zonas de plasticidad concentrada en elementos diagonales de acero en la conexión viga - columna. b) Zonas de plasticidad concentrada en elementos diagonales de acero en el nudo medio de la viga.

Para el modelo de OpenSees se requiere nuevos nudos, coordenadas X, Y e identificación de los nudos iniciales y finales que componen a cada elemento, a más de ello es necesario identificar las secciones que se deben asignar a cada elemento. Se genera la función **[Tabla\_Elem\_Nud\_Diag, nod\_Diag, X\_Diag, Y\_Diag] = ElementosNudosDiagonales(nod, num\_COL\_VG, num\_Diag, NI\_Diag, NJ\_Diag, X, Y, L\_rig)**; en este caso la matriz Tabla\_Elem\_Nud\_Diag contiene la información relevante de nudos y elementos. Generando un modelo como se indica en la figura 44, donde se enumeran los elementos en las diagonales a partir de la última viga, es decir del elemento 300.



**Figura 44** Numeración de elementos; a) Pórticos de diagonales en forma de V invertida; b) Pórticos de diagonales en forma de X de múltiples pisos.

Este nuevo modelo se puede visualizar 60 elementos diagonales, es por ello que la matriz denominada **Tabla\_Elem\_Nud\_Diag** tiene 60 filas donde cada una de ellas corresponde a un elemento. Esta matriz tiene 4 columnas donde la primera corresponde a una etiqueta, es decir número de elemento original (figura 36c y 36e) seguido de 2 ceros y el último número corresponde a los segmentos del 1 al 5 en que fue dividido el elemento; la columna 2 y 3 corresponde al nudo inicial y final de cada nuevo elemento, la columna 4 es una etiqueta para identificar qué tipo de propiedad corresponde a este elemento. El número de la columna 4 puede ser 0 para elementos rígidos (misma propiedad que un elemento elástico, pero con área e inercia multiplicada por 10), luego 1 para elementos inelásticos con comportamiento de armadura (**Truss**), 4 para zonas de plasticidad concentrada con propiedades de un elemento bilineal **steel02**.

Tabla_Elem_Nud_Diag				
60x4 double				
	1	2	3	4
1	61001	2	287	0
2	61002	287	288	4
3	61003	288	289	1
4	61004	289	290	4
5	61005	290	8	0

Tabla_Elem_Nud_Diag				
60x4 double				
	1	2	3	4
6	62001	3	291	0
7	62002	291	292	4
8	62003	292	293	1
9	62004	293	294	4
10	62005	294	8	0

**Figura 45** Fragmento de Tabla\_Elem\_Nud\_Diag a) Primera diagonal (elemento 61 de la figura 36) b) Segunda diagonal (elemento 62 de la figura 36).

### 8.1. Modelo para zonas de plasticidad concentrada en las diagonales de acero

El modelo para el comportamiento no lineal de las diagonales de acero denominado **steel02** se basa en el modelo de Giuffr -Menegotto-Pinto. Este material es usado para la modelaci3n cíclica de acero estructural y varillas de refuerzo en hormig3n armado. Sin embargo, debido a que el análisis es un Pushover monot3nico, las diagonales de acero son simulados con modelos simplificados sin tener en cuenta el comportamiento real de estos elementos ante cargas reversibles.

En la Figura 46 se muestra el comportamiento del material **steel02**. La curva constitutiva del material indica un comportamiento que se basa en una rigidez inicial, seguido de una zona de transici3n exponencial hasta un endurecimiento del material (Bosco, Ferrara, Ghersi, Marino, & Rossi, 2014).



Figura 46 Modelo para las articulaciones en las diagonales de acero.

## 9. TRANSFORMACIONES GEOMÉTRICAS EMPLEADAS EN OPENSEES

Durante la definición de los elementos vigas, columnas y diagonales de acero es necesario definir el tipo de transformación de los parámetros estructurales de rigidez y fuerzas resultantes. Las transformaciones geométricas se emplean para pasar del sistema de coordenadas fundamentales a un único sistema de coordenadas globales como se puede visualizar en la figura 47.

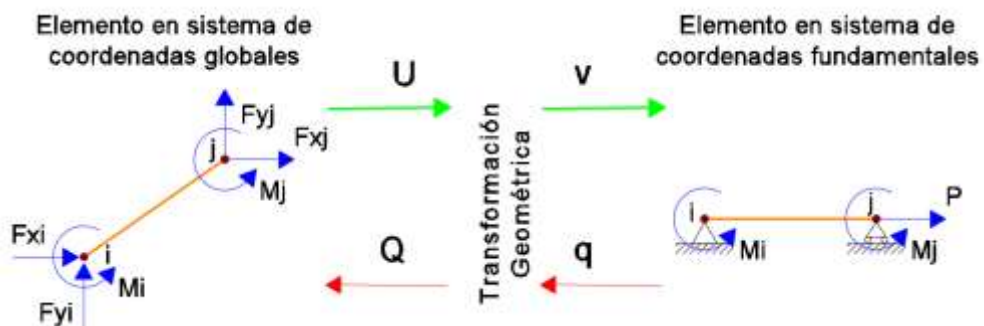


Figura 47 Cambio de sistemas de coordenadas mediante transformaci3n geométrica.



Para explicar las transformaciones geométricas se emplea el vector de fuerzas de un sistema global denominado  $Q_{global}$ , relacionado con el vector de fuerzas de un sistema fundamental  $Q_{fundamental}$ .

$$Q_{fundamental}^T = [P \ M_i \ M_j] \quad (16)$$

$$Q_{global}^T = [F_{xi} \ F_{yi} \ M_i \ F_{xj} \ F_{yj} \ M_j] \quad (17)$$

La matriz de transformación  $T$ , que relaciona los vectores de fuerzas como se indica en la ecuación (18), se puede separar en dos transformaciones, una que realiza la transformación de coordenadas fundamentales a locales y otra que realiza la transformación de coordenadas locales a globales.

$$Q_{global} = T^T \cdot Q_{fundamental} \quad (18)$$

$$T = T_{a\ local} \cdot T_{a\ global} \quad (19)$$

En el trabajo de Denavit y Hajjar (2013), se estudia el tema de las transformaciones geométricas, en el mismo se presenta las matrices de transformación corrotacional al sistema de coordenadas global y local (matrices 20 y 21), donde los parámetros  $\beta$  y  $L$  corresponden al ángulo y la longitud de la barra como se muestra en la figura 48, los cuales con la transformación corrotacional varían en cada paso del análisis mientras que al emplear transformación geométrica lineal estos valores son los iniciales  $\beta_0$  y  $L_0$  (matrices 22 y 23).

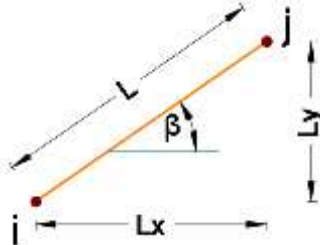


Figura 48 Geometría de un elemento tipo barra.

$$T_{a\ global} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \text{sen}(\beta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\beta) & \cos(\beta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\beta) & \text{sen}(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$T_{a\ local} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 1 & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 & 1/L & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$T_{a\ global} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_0) & \text{sen}(\beta_0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\beta_0) & \text{sen}(\beta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$



$$T_{a\ local} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 1 & 0 & -1/L_0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 0 & 0 & 1/L_0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Las matrices de transformación P-Delta presentan la forma expuesta en 25 y 26, donde el término  $\delta\Delta_y$  es la diferencia entre el desplazamiento transversal de los nudos, en el sistema local de coordenadas como se indica en la ecuación 24.

$$\delta\Delta_y = \Delta_{y,nodo\ i} - \Delta_{y,nodo\ j} \quad (24)$$

$$T_{a\ global} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_0) & \text{sen}(\beta_0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\beta_0) & \text{sen}(\beta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$T_{a\ local} = \begin{bmatrix} -1 & \delta\Delta_y/L_0 & 0 & 1 & -\delta\Delta_y/L_0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 1 & 0 & -1/L_0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 0 & 0 & 1/L_0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Matemáticamente la matriz de transformación lineal es constante, por lo tanto, se calcula únicamente al inicio del análisis con base a la geometría original de los elementos, es decir sin deformar. El cálculo de la matriz de transformación P-Delta requiere de un esfuerzo computacional adicional ya que también depende de los desplazamientos de los nudos del elemento, en cada paso del análisis, y más aún la matriz de transformación corrotacional, que debe ser calculada en cada paso del análisis en base a la geometría del elemento en dicho instante. En la tesis de Del Rincón (2017), se menciona que “la transformación corrotacional toma en cuenta los cambios de longitud y posición del elemento en cada paso mientras que la transformación p-delta asume la teoría de los pequeños desplazamientos”.

OpenSees cuenta con estos tres métodos para realizar la transformación geométrica de los elementos, es decir: lineal, P-Delta y corrotacional.

En los modelos de las estructuras presentadas en este artículo, debido a que el análisis es un Pushover monótonico y para optimizar el esfuerzo computacional se emplea la transformación geométrica lineal para vigas, asumiendo piso rígido (mismo desplazamiento horizontal en los nudos de las vigas); P-Delta para columnas porque básicamente se tiene desplazamientos laterales y la transformación geometría corrotacional, en los elementos diagonales de acero, ya que las deformaciones son mayores y el cambio de su longitud es importante de considerar.

## 10. DATOS DE OPENSEES GENERADOS POR CEINCI-LAB

A continuación en la figura 49, se muestra una parte del código en el cual se puede notar la función denominada **Pushover\_OpenSees\_Diag()**, que se presenta de color rojo para distinguirla, en este caso no existen datos de ingreso y

salida debido a que esta rutina trabaja con variables globales definidas al inicio del programa. Sin embargo, al ejecutarse esta línea, se genera un archivo con extensión TCL cuyo nombre es **Estructura\_Pushover\_Ref.tcl**, este proceso es similar al que se visualiza en la figura 26.

#### Código del programa principal, parte 7b:

```
[Tabla_Elem_Nud_Diag,nod_Diag,X_Diag,Y_Diag]=ElementosNudosDiagonales(nod,num_COL_VG,num_Diag,NI_Diag,NJ_Diag,X,Y,L_rig);
NI_Diag=Tabla_Elem_Nud_Diag(:,2);
NJ_Diag=Tabla_Elem_Nud_Diag(:,3);
[L_Diag,seno_Diag,coseno_Diag]=longitud(X_Diag,Y_Diag,NI_Diag,NJ_Diag);
%long. de @elem, seno y coseno
NI_Diag=[NI,NI_Diag]; NJ_Diag=[NJ,NJ_Diag];
%% Nudos con grados de libertad iguales
[DOF]=MismosGDL(nod,np,Xcol,Ypisos,X,Y);
Pushover_Opensees_Diag()
```

Figura 49 Código del programa principal, parte 7b.

Para verificar gráficamente el modelo generado en CEINCI-LAB se puede elaborar los dibujos del pórtico en análisis, en este caso la función **dibujoNudElemMODPUSH(X\_Diag,Y\_Diag,NI\_Diag,NJ\_Diag)** presenta un gráfico como se muestra en la figura 50b y 50c, en el cual se incluyen los nudos y elementos columnas, vigas y diagonales que componen al pórtico, con una distribución similar a la presentada en la figura 44.

#### Código del programa principal, parte 8b:

```
%% Dibujos
dibujoNudElemMODPUSH(X_Diag,Y_Diag,NI_Diag,NJ_Diag)
```

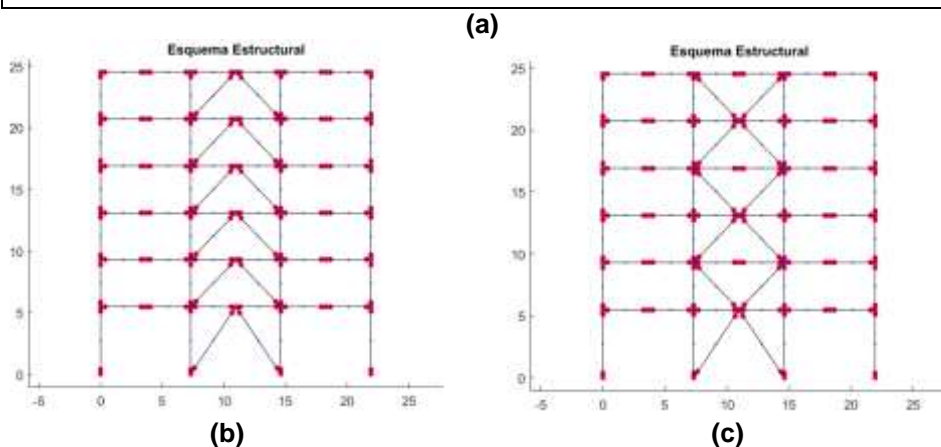


Figura 50 a) Código del programa principal, parte 8b. b) Estructura con diagonales en V invertida; c) Estructura con diagonales en X de múltiples pisos.

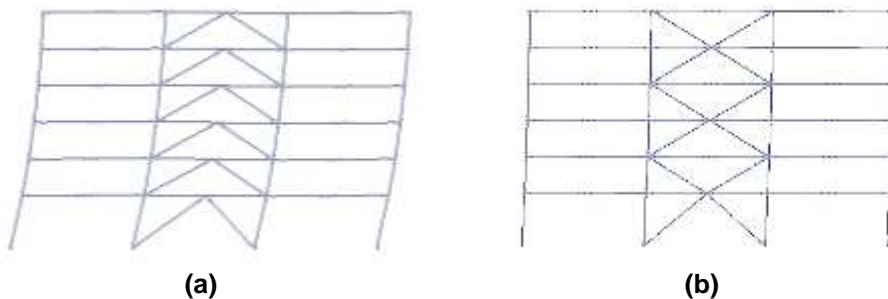
El archivo **Estructura\_Pushover\_Diag.tcl** que se genera en la carpeta que se está almacenando el programa en MATLAB, es ejecutado posteriormente por OpenSees y genera los cálculos necesarios para el Pushover, la línea que indica esta acción se muestra a continuación en la figura 51, donde el comando empieza con un signo de admiración (!), luego se escribe **OpenSees.exe** seguido por el nombre del archivo tcl que describe el modelo, en este caso **Pushover\_Estructura\_Ref.tcl**

**Código del programa principal, parte 9b:**

```
! OpenSees.exe Pushover_Estructura_Ref.tcl
```

**Figura 51** Código del programa principal, parte 9b.

Al ejecutarse OpenSees desde Matlab se generan los cálculos del Pushover del modelo propuesto y aparece una ventana emergente con la simulación del análisis como se muestra en la figura 52.



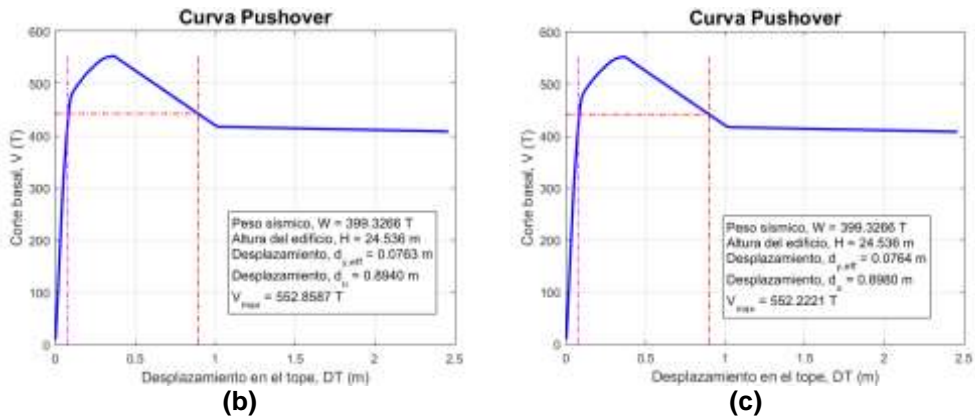
**Figura 52** Ventana con la simulación del análisis Pushover en OpenSees. a) Estructura con diagonales en V invertida; b) Estructura con diagonales en X de múltiples pisos.

La función **Graficar\_Pushover2.m** es la que genera la gráfica con desplazamiento en el tope y cortante basal, es decir la curva del análisis Pushover, como se muestra en la figura 53b y 53c. En las gráficas se indican las líneas que corresponde a los desplazamientos de fluencia y desplazamiento último similar a la figura 31.

**Código del programa principal, parte 10b:**

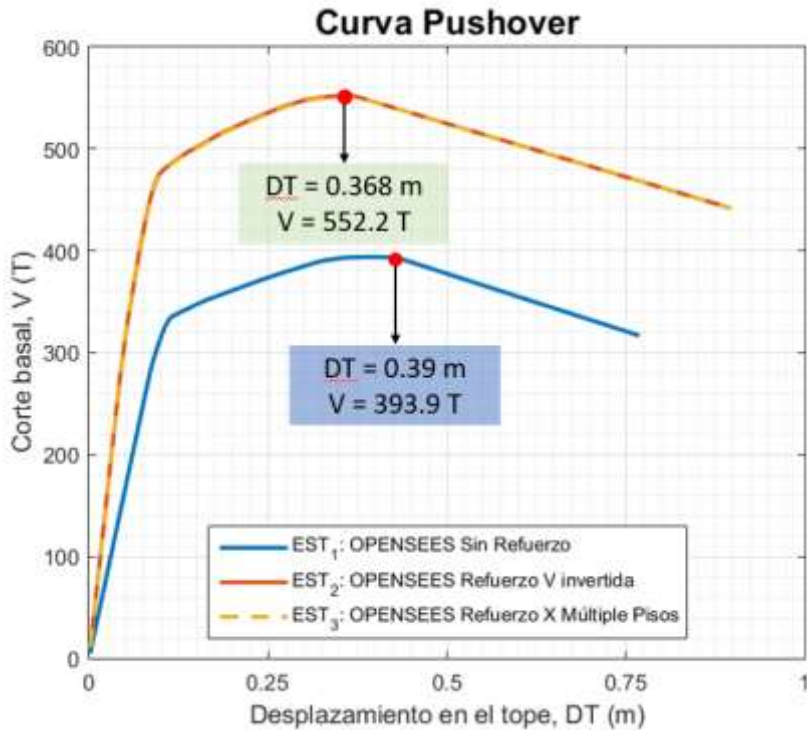
```
%% Gráfica Pushover
Tfundamental=textread('Resultados_Modal\Periodo_Fundamental.out');
[Vbase,DT]=Graficar_Pushover2(nr,WBuilding,HBuilding,FP,Tfundamental);
Resultados=[Vbase,DT];
```

**(a)**



**Figura 53** a) Código del programa principal, parte 10b. Curva Pushover generada por CEINCI-LAB mediante el acoplamiento con OpenSees. b) Estructura con diagonales en V invertida; c) Estructura con diagonales en X de múltiples pisos.

En la figura 54 se puede observar que las estructuras con diagonales aumentan la rigidez y resistencia ante cargas laterales. Las estructuras con diagonales presentan una ventaja, se puede apreciar un aumento de aproximadamente 40% en la fuerza máxima de corte en la base de la estructura.



**Figura 54** Curva Pushover generada por CEINCI-LAB mediante el acoplamiento con OpenSees.

En el anexo 1 se presenta el código completo para el análisis no lineal estático mediante la técnica de Pushover, al inicio del programa se debe decidir para qué estructura es el análisis. En este caso se entiende la variable ESTRUCTURA 1 para el pórtico sin reforzamiento, 2 para agregar los elementos en V invertida y 3 para diagonales en X de múltiples pisos.

## **11. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES**

El objetivo de este artículo es dar a conocer al lector las nuevas funciones de CEINCI-LAB y su acoplamiento a OpenSees, de modo que se facilite la modelación y el ingreso de la estructura para su debido análisis. Es conocido que tanto CEINCI-LAB como OpenSees, pueden realizar independientemente el análisis Pushover, sin embargo, se busca ilustrar un enfoque aprovechando el potencial de ambos programas computacionales.

La versatilidad del ingreso de los datos para la geometría de la estructura en CEINCI-LAB, resulta muy conveniente para el entendimiento del usuario y ahorra tiempo notablemente, el posterior análisis en OpenSees y la devolución de resultados para procesar de la manera que considere más adecuada el usuario, hacen de estas herramientas un conjunto provechoso para el investigador.

Con el programa presentado en este artículo, es posible generar un código para análisis Pushover de estructuras metálicas en OpenSees que puede ser modificado o se puede cambiar de forma parcial la programación en función del criterio técnico del usuario, lo que potencia un código flexible para nuevas investigaciones.

Se muestra además el modelo de plasticidad concentrada, bajo el que se prepara el análisis y la forma de detallar cada elemento, para así obtener los resultados de las curvas Pushover de cada estructura, es importante notar que se logra estimar una sustancial diferencia entre las propuestas de estructuras en análisis.

Los mecanismos de reforzamiento propuestos son una buena alternativa cuando se requiere aumentar la rigidez lateral y resistencia de las estructuras ante solicitaciones de cargas laterales, como puede ser el sismo. Las diagonales en forma de V invertida presentan ventajas de arquitectura y funcionalidad, no obstante, se requiere evaluar que el desbalance de fuerzas en la viga no provoque una falla a flexión. Una alternativa para controlar este problema es colocar las diagonales en forma de X de piso a piso, esto a más de aumentar la rigidez y resistencia elimina el problema del caso anterior.

## **AGRADECIMIENTO**

Al Ing. Patricio Palacios, estudiante de maestría de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, por sus valiosos comentarios en la revisión de este artículo.

## REFERENCIAS

1. Aguiar, R., Mora, D., & Rodríguez, M. (2015). Diagrama momento curvatura y momento-rotación para elementos de hormigón armado y acero con ASCE/SEI 41 y sistema de computación CEINCI-LAB. *Revista Ciencia*, 17(2), 191-228.
2. Aguiar, R., Cagua, B., Pilatasig, J., & Zambrano, E. (2019). Interfase ICEINCI-LAB y nuevas funciones. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 24(2), 167-199.
3. Aguiar, R., Cagua, B., & Pilatasig, J. (2019). Nuevas funciones del sistema CEINCI-LAB para análisis sísmico espacial. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 24(3), 259-276.
4. Applied Technology Council, & United States. Federal Emergency Management Agency. (2009). *Quantification of building seismic performance factors*. US Department of Homeland Security, FEMA.
5. Arango, S., Paz, A., & Del Pilar Duque, M. (2013). Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño estructural de una estantería metálica. *Revista EIA*, 6(12), 139-154.
6. ASCE 41 (2013), *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, ASCE Standard ASCE/SEI 41-13, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
7. Astudillo, B. (2018). Modelación y análisis por desempeño de una estructura de acero, considerando deterioro para la predicción del colapso.
8. Barrera D., (2018). Modelación elasto-plástica y análisis no lineal de una estructura especial de acero utilizando OpenSees, Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca.
9. Bosco, M., Ferrara, E., Ghersi, A., Marino, E., & Rossi, P. P. (2014). Improvement of the Model Proposed by Menegotto and Pinto for Steel. *European Conference on Earthquake Engineering and Seimology*(2), 25-29.
10. Carr, A. (2009). RUAUMOKO theory manual. *University of Canterbury, New Zealand*.
11. Chopra, A. (2012). *Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. 4th Edition. University of California at Berkeley. USA.
12. Denavit, D. M., Hajjar, F.J., (2013). "Description of geometric nonlinearity for beamcolumn analysis in OpenSees", Report NEU-CEE-2013-02, *Department of Civil and Environmental Engineering, Northeastern University, Boston, Massachusetts*. <http://hdl.handle.net/2047/d20003280>.
13. Del Rincón, A. (2017). *Contravientos en la respuesta sísmica de edificios regulares* (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información.).
14. Del Valle E., Lobo W., Vielma J. C., (2014) "Análisis comparativo de la capacidad de disipación de energía de edificios de acero con diagonales concéntricas y excéntricas", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 19 (2), 143-171
15. Díaz L., Moscoso M., Campbell J., Durán M., Aguiar R. (2015), "Estudio Experimental de pórticos de hormigón armado solicitado a cargas laterales crecientes", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 20 (1), 101-113.

16. Felippa, C.; "Introduction to Finite Element Methods", Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Aerospace Structures University of Colorado Boulder, Colorado, 2004.
17. FEMA 356 (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Prepared by the American Society of Civil Engineers (ASCE), Federal Emergency Management Agency (FEMA). Washington D.C., USA.
18. García, S. (2013). Modelo simplificado de pocos grados de libertad, para simular el impacto de una roca sobre una viga de hormigón armado. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Madrid.
19. García, Ó. R., García, L. M. J., Castelló, L. P., Aparicio, A. G., & Vidal, A. P. (2018). *MATLAB: conceptos básicos y descripción gráfica*. Universidad Miguel Hernández.
20. Godínez E., López Almansa F., (2014), "Importancia del diseño de las conexiones viga columna en la capacidad sismo resistente de edificios dúctiles de concreto reforzado en México", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **19 (2)**, 113-142.
21. Godínez E., Tena A., (2014), "Efectos de modos superiores en la respuesta no lineal de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico tipo Crevrón. Caso de Estudio". *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **19 (2)**, 173-185.
22. Herrera, M., Parra, K., Palacios, P., Palacios, P., Olmedo, J., Cagua, B., Pilatasig, J., & Palma, D. (2019). Análisis sísmico espacial de estructuras reforzadas con diagonales de acero utilizando CEINCI-LAB. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **24(4)**, 343-363.
23. Hughes, T. (1987). "The Finite Element Method. Linear Static and Dinamic Finite Element Analysis", ISBN 0-13-317017-9, Prentice-Hall.
24. Ibarra L.F., Medina R. A., and Krawinkler H. (2005). *Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **34(12)**, 1489-1511. Stanford University, Stanford, CA. USA.
25. Lignos, D. G., & Krawinkler, H. (2007). A database in support of modeling of component deterioration for collapse prediction of steel frame structures. In *Structural Engineering Research Frontiers* (pp. 1-12).
26. Lignos D, Krawinkler H. (2009). *Sidesway Collapse of Deteriorating Structural Systems under Seismic Excitations*. Report No. TR-172, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University, California. USA.
27. Lignos, D. G., Krawinkler, H., & Whittaker, A. S. (2011). Prediction and validation of sidesway collapse of two scale models of a 4-story steel moment frame. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **40(7)**, 807-825.
28. Lignos, D. G., & Krawinkler, H. (2011). Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading. *Journal of Structural Engineering*, **137(11)**, 1291-1302.
29. Mora D., Aguiar R., (2015,1), "Modelación de diagrama momento-curvatura y momento-rotación en secciones de acero estructural", *Revista Ciencia*, **17 (1)**, 99-124. Universidad de Fuerzas Armadas, ESPE, Quito, Ecuador.



30. Mora D., Aguiar R., (2015, 2), "Pushover multimodal en estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **20 (2)**, 157-197.
31. Paz, M. (1992). *Dinámica estructural: teoría y cálculo*. Reverté.
32. Rogac, M. (2012). "Plastic Analysis of Steel Frame Structure", Civil Engineering Forum, Volume XXI/2.
33. Kitayama, S., & Constantinou, M. C. (2017). Seismic Performance Evaluation -A Primer.
34. Tapia E., Gutiérrez S., (2016), "Respuesta inelástica de edificios de acero usando diferentes patrones de carga lateral", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **21 (1)**, 105-122.
35. Zaradnik, R.; Raichman, S: & Mirasso, A. (2006). "Formulación de matrices de masas concentradas para análisis dinámico de estructuras de materiales compuestos". II Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería (EnIDI 2006), Mendoza, 2006. En: Desarrollos e Investigaciones Científico Tecnológicas en Ingeniería, pp. 267 a 273, ISBN 987-05-1360-3.
36. Zaradnik, R. (2009). "Análisis de Estructuras con Materiales Compuestos". Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
37. Zaradnik, R., Raichman, S., & Mirasso, A. E. (2009). Comparación de Diversas Matrices de Masas Concentradas con Similitud de Modos Propios. *Mecánica Computacional*, **28(10)**, 853-869.

## ANEXO 1.0

```

clear;clc
format short
% Acoplar OPENSEES con CEINCI-LAB
global DOF nod sv sp nv np nr X Y NI NJ n masa_nudo Xcol Ypisos L
global coseno Es Abeam Ibeam Mybeam Ks_beamxL qp
global Acol Icol Mycol Ks_colxL num_elem Tabla_Elem_Nud
global DP DN th_pP th_pN th_pcP th_pcN Dis_Fuerzas_Laterales T W fi
%.....
global nod_Diag X_Diag Y_Diag NI_Diag NJ_Diag Abrace Ibrace num_Diag
Tabla_Elem_Nud_Diag
global Fy_brace Es_brace
%% Geometría del pórtico
Usos_Conexion = 1; % Si la conexión es Precalificada 1, sino 2 entonces Cpr = 1.
ESTRUCTURA = 3; % 1 Sin refuerzo, 2 Con V invertida y 3 con X múltiples pisos
Graficar=0; % 0 si no quiere graficar, 1 en función del num de ESTRUCTURA,
2 Todas
sv =[7.315;7.315;7.315]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp =[5.486;3.81; 3.81; 3.81; 3.81; 3.81]; %Ingresar un vector con la altura de pisos
en (metros)
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-1.8517]; % carga distribuida en vigas en
cada piso T/m
% .....
mar = [2;5;8;11;14;17]; % Para las V invertidas
mar2 = [2;8;14]; % Para las V invertidas en el modelo con X
marv = [5;11;17]; % Para las V en el modelo con X
%Para diagonales se calcula el área e inercia
diae=0.18; %Diámetro exterior
diai=0.18-8*2/1000; %Diámetro interior
% .....
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); %Calcula los grados de libertad
[VC]=vc(NI,NJ,CG);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_COL_VG=length(L);
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
% .....
[GEN]=geometria_nudo_diagonales(nv, np, nudt, mar);
[NI2,NJ2]=gn_portico(GEN);
[NI_Diag2,NJ_Diag2]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
% .....
[GEN]=geometria2_nudo_diagonales(nv, np, nudt,mar2,marv);
[NI3,NJ3]=gn_portico(GEN);
[NI_Diag3,NJ_Diag3]=gn_portico3(NI,NJ, NI3,NJ3);
% .....
NI_Dib{1}=NI; NI_Dib{2}=NI_Diag2; NI_Dib{3}=NI_Diag3;

```

```

NJ_Dib{1}=NJ; NJ_Dib{2}=NJ_Diag2; NJ_Dib{3}=NJ_Diag3;
% .....
if ESTRUCTURA ==1
NI_Diag=NI;
NJ_Diag=NJ;
elseif ESTRUCTURA ==2
NI_Diag=NI_Diag2;
NJ_Diag=NJ_Diag2;
elseif ESTRUCTURA ==3
NI_Diag=NI_Diag3;
NJ_Diag=NJ_Diag3;
NI2=NI3;
NJ2=NJ3;
end

[VC_Diag]=vc(NI_Diag,NJ_Diag,CG);
[L_Diag,seno_Diag,coseno_Diag]=longitud(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag); %long. de
@elem, seno y coseno
%% Masas
W=zeros(np,1);
for t=1:np
sum=0;
for r=1:nv
sum=-qp(t,1)*sv(r,1);
W(t,1)=W(t,1)+sum;
end
end
sum=0;
WBuilding=0;
for i=1:np
WBuilding=WBuilding+W(i,1); %Peso total en T
for ij=1:nv+1
if ij==1
NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(ij,1)/2;
elseif ij==nv+1
NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(nv,1)/2;
else
NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(ij-1,1)/2+(-qp(i,1)/g)*sv(ij,1)/2;
end
masa_nudo(i,ij)=NodalMass;
end
MASA(i,i)=W(i,1)/g;
end
% Dis_Fuerzas_Laterales = 1; % 1 En función del primer modo de vibrar
% 2 Distribución parabólica; % 3 Distribución triangular; % 4 Distribución uniforme
Dis_Fuerzas_Laterales = 1;

%% Dibujo de la Estructura 2D
if Graficar==0
elseif Graficar==1
dibujo(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag)

```

```

dibujoNudElem(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag,CG)
dibujogdl(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag,CG)
else
  for op=1:3
    dibujo(X,Y,NI_Dib{op},NJ_Dib{op})
    dibujoNudElem(X,Y,NI_Dib{op},NJ_Dib{op},CG)
    dibujogdl(X,Y,NI_Dib{op},NJ_Dib{op},CG)
  end
end

%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2
Fy_brace=Fy;
Es_brace=Es;
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2
if Uso_Conexion==1
  Cpr=(Fy+Fu)/(2*Fy); % Factor que toma en cuenta la resistencia máxima de la
  conexión.
  if Cpr < 1.2
    Cpr=Cpr;
  else
    Cpr =1.2;
  end
else
  Cpr=1;
end

%% Secciones de los elementos
% Column section % W30x173
Zx = 0.0098;
Acol = 0.0326;
Icol = 0.0034;
Mycol =Fy*Zx*Cpr;
d_col= 773.2 / 1000.0;
% Brace section % Tcircular Diámetro de 18 cm y espesor de 8 mm
Abrace=pi*diae^2/4-pi*diai^2/4; % área
Ibrace=pi*diae^4/64-pi*diai^4/64; % inercia
% beam section % W30x99
Zx = 0.0051;
Abeam = 0.0186;
Ibeam = 0.0017;
Mybeam = Fy*Zx*Cpr;
d_beam = 754.4 / 1000.0;
% beam springs at Floor 2 # % W30x99
DP= 0.886; % rate of cyclic deterioration for pos loading
DN= 0.886; % rate of cyclic deterioration for neg loading

th_pP= 0.0204; % plastic rot capacity for pos loading
th_pN= 0.0204; % plastic rot capacity for neg loading

th_pcP= 0.1001; % post-capping rot capacity for pos loading

```

```

th_pcN= 0.1001; % post-capping rot capacity for neg loading
% .....
%% Propiedades dinámicas
if ESTRUCTURA==1
    [Seccion]=Unica_Vg_COL(nudt,coseno,Acol,lcol,Abeam,lbeam);
    %Seccion=[ELEMENTO, BASE, ALTURA, NUMEROS DE ELEMENTOS A
    CREAR, INCREMENTO EN NUMERO DE ELEMENTO]
    [ELEM]=gelem_portico(Seccion);
    % Matriz de Rigidez
    ELEMH=ELEM(1:length(NI),:);
    [KH]=krigidez_acero(ngl,ELEMH,L,seno,coseno,VC,Es);
    KTT=KH; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (Tn/m)
else
    [Seccion]=Unica_Vg_COL(nudt,coseno,Acol,lcol,Abeam,lbeam);
    Seccion=[Seccion; length(NI)+1 Abrace lbrace 11 1];
    [ELEM]=gelem_portico(Seccion);
    % Matriz de Rigidez
    ELEMH=ELEM(1:length(NI),:);
    [KH]=krigidez_acero(ngl,ELEMH,L,seno,coseno,VC,Es);
    %Contribucion de elementos Diagonales de Acero
    ELEMA=ELEM(length(NI)+1:end,:);
    LA=L_Diag(length(NI)+1:end); senoA=seno_Diag(length(NI)+1:end);
    cosenoA=coseno_Diag(length(NI)+1:end); VCA=VC_Diag(length(NI)+1:end,:);
    num_Diag=length(LA);
    %%%%%%%%%% UNIDADES cm
    Est = Es/10; % Módulo de elasticidad, (kg/cm2)
    H=sp*100;
    hci=d_col*100;hcd=d_col*100;hdis=0;Lon=sv(2,1)*100;hv=d_beam*100;
    Kef=zeros(np,1);
    for ie=1:np
        [Kdiag(ie),Keq(ie)]=rigidez_equivalente_TADAS(hci,hcd,hdis,Lon,hv,H(ie),Kef(ie),A
        brace*10000,Est);
        end
        Kdiag=Kdiag/10; % Para tener en T/m
        ELEMNT_Diag=[Kdiag(1);Kdiag(1);
            Kdiag(2);Kdiag(2);
            Kdiag(3);Kdiag(3);
            Kdiag(4);Kdiag(4);
            Kdiag(5);Kdiag(5);
            Kdiag(6);Kdiag(6)];
        [KA]=krigidez_tadas(num_Diag,ngl,ELEMNT_Diag,senoA,cosenoA,VCA);
    %Rigidez de Diagonales
    KTT=KH+KA; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (Tn/m)
    end
    na=np;
    kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
    kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
    KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
    %.....
    [T,fi,OM]=orden_eig(KL,MASA);

```

```

% Factores de participacion modal
b=ones(np,1);
for i=1:np
maxfi=max(abs(fi(:,i)));
fi(:,i)=fi(:,i)/maxfi;
end
for i=1:np
  FP(:,i)=abs(((fi(:,i))*MASA*b)/((fi(:,i))*MASA*(fi(:,i))));
end
disp('Los periodos de vibración en segundos con CEINCI-LAB son:')
T % seg
% Grabar matrices de masa y rigidez
Masa_Rigidez = [MASA,KL];
mkdir Prop_Dinamicas_Estructuras_2D
save(['Prop_Dinamicas_Estructuras_2D\EST_' num2str(ESTRUCTURA)
'_M_K.txt'],['Masa_Rigidez'],'-ascii'); %DATO:Dirección carpeta
% break
%% Elementos y nudos
[Tabla_Elem_Nud,nod,X,Y]=ElementosNudos(nudt,nudcol,nod,NI,NJ,X,Y,d_col,d_
beam);
% .....
NI=Tabla_Elem_Nud(:,2);
NJ=Tabla_Elem_Nud(:,3);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_elem=nudt*5;
HBuilding=max(Y);
L_rig=0.6;
NI2=[zeros(1,length(NI)), NI2(1,end-num_Diag+1:end)];
NJ2=[zeros(1,length(NI)), NJ2(1,end-num_Diag+1:end)];
[NI_Diag,NJ_Diag]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
% .....
[Tabla_Elem_Nud_Diag,nod_Diag,X_Diag,Y_Diag]=ElementosNudosDiagonales(n
od,num_COL_VG,num_Diag,NI_Diag,NJ_Diag,X,Y,L_rig);
NI_Diag=Tabla_Elem_Nud_Diag(:,2);
NJ_Diag=Tabla_Elem_Nud_Diag(:,3);
[L_Diag,seno_Diag,coseno_Diag]=longitud(X_Diag,Y_Diag,NI_Diag,NJ_Diag);
%long. de @elem, seno y coseno
NI_Diag=[NI,NI_Diag];
NJ_Diag=[NJ,NJ_Diag];
%% Nudos con grados de libertad iguales
[DOF]=MismosGDL(nod,np,Xcol,Ypisos,X,Y);
%% Dibujos
if ESTRUCTURA==1
  dibujoNudElemMODPUSH(X,Y,NI,NJ)
  Pushover_Opensees()
  ! OpenSees.exe Pushover_Estructura.tcl
else
  dibujoNudElemMODPUSH(X_Diag,Y_Diag,NI_Diag,NJ_Diag)
  Pushover_Opensees_Diag()
  ! OpenSees.exe Pushover_Estructura_Ref.tcl
end

```

```
%% Gráfica Pushover
Tfundamental=textread('Resultados_Modal\Periodo_Fundamental.out');
[Vbase,DT]=Graficar_Pushover3(nr,WBuilding,HBuilding,FP,Tfundamental);
Resultados=[Vbase,DT];
%% Grabar los archivos
mkdir Pushover_Estructuras_2D
save(['Pushover_Estructuras_2D\EST_' num2str(ESTRUCTURA)
'.txt'],['Resultados'],'-ascii'); % .DATO: Dirección carpeta
```